INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE
CHAIRE DE
PHYSICO-CHIMIE
ET SCIENCE
DU SOL
CENTRE DE GRIGNON

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE AGRONOMIQUE DE GRIGNON
CHAIRE DE PHYSICO-CHIMIE ET SCIENCE DU SOL

ANNALES AGRONOMIQUES

VOLUME 19
1968

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE
149, rue de Grenelle - PARIS 7e

ANNALES
AGRONOMIQUES

VOLUME 19 1968 NUMÉRO 1

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE
149, rue de Grenelle, PARIS-7e

NOTICE NÉCROLOGIQUE

Maurice LEMOIGNE (1883-1967)

L'Institut national de la Recherche agronomique, et plus particulièrement le Département Agronomie de cet organisme, ont été profondément attristés par le décès du Professeur Maurice LEMOIGNE survenu le 9 mai 1967. Ingénieur agronome, Docteur ès Sciences, sa carrière s'est déroulée à l'Institut Pasteur de Paris puis de Lille, il fut ensuite Professeur à l'Institut national agronomique et enfin Chef du Service des Fermentations à l'Institut Pasteur. En outre, pendant dix-huit années il a été Président du Comité scientifique permanent de notre Institut.

Les aspects scientifiques de son œuvre ont été retracés à l'Académie des Sciences dont il était membre, le 12 juin 1967 par le Professeur DUJARRIC de la RIVIÈRE, et nous ne saurions rien ajouter à ce qui a été dit sur ce sujet, en cette circonstance. D'autre part, Monsieur le Directeur général BUSTARRET l'a rappelé au cours de la séance du 14 juin 1967 de l'Académie d'Agriculture à laquelle il appartenait également, ses mérites d'Agronome et plus encore les services exceptionnels qu'il a rendus à l'I. N. R. A., tant par ses connaissances scientifiques que par ses qualités humaines.

Nous tenions à associer nos *Annales* aux hommages qui ont été rendus à un Savant qui fut pour beaucoup de chercheurs du Département Agronomie un Maître et qui reste pour tous un exemple.

S. HENIN

Ann. agron., 1968, **19** (1), 5-51.

LES FACTEURS TECHNIQUES DE LA PRODUCTION DE LA PÊCHE TARDIVE EN MOYEN VIVARAIS.

J.-P. DEFFONTAINES et R. GRAS
avec la collaboration technique de J. OUDARD

Service d'Expérimentation et d'Information,
Laboratoire des Sols,
Centre national de Recherches agronomiques, 78 - Versailles
Institut national de la Recherche agronomique

SOMMAIRE

Dans le cadre de l'étude globale des productions agricoles d'une région, les auteurs ont cherché à déterminer par voie d'enquête, parmi l'ensemble des facteurs liés au milieu physique ou aux techniques, ceux qui permettent d'assurer le plus grand accroissement de la production de pêche tardive.

La méthode utilisée permet de mettre en évidence l'effet de certains facteurs sur les rendements ; c'est le cas notamment de la pente, du taux de cailloux, pour les arbres non irrigués, de la profondeur du labour de défoncement, de l'épaisseur de sol exploitée par les racines, pour les arbres irrigués, des caractéristiques de structure du sol dans les deux éventualités.

D'autres facteurs s'avèrent sans effet sur le rendement ; il en est ainsi de la texture de la terre fine, de l'apport de matière organique en entretien. Pour d'autres facteurs enfin, le rôle sur les rendements ne peut être précisé par suite de difficultés relatives à la méthode utilisée ; c'est le cas de l'irrigation, de la fumure, de la taille des arbres.

A l'occasion de cette analyse les auteurs ont cherché à préciser l'intérêt et les limites du type d'enquête retenu.

I. — PRÉSENTATION

Dans une région du département de l'Ardèche (1), une étude a été entreprise à la demande de la Chambre d'Agriculture pour définir les facteurs d'augmentation de la production et l'équilibre le plus souhaitable entre la polyculture, l'élevage et l'arboriculture.

Ce travail a été plus particulièrement détaillé dans le cas de l'arboriculture (pêche, cerise), qui présente un grand intérêt économique dans la région.

(1) Située à la latitude de Tournon : communes de Saint-Barthélémy-le-Plein, Colombier-le-Jeune, Gilhoc, Saint-Sylvestre, Colombier-le-Vieux.

L'étude qui suit concerne la production de la pêche tardive. Elle a été réalisée par voie *d'enquête*. Nous entendons par enquête la démarche consistant à obtenir des informations à partir d'observations, de mesures et de témoignages ; elle revient donc à révéler des données déjà existantes. L'étude en question répond à cette définition et, de plus, présente des caractères propres : elle est monographique (c'est-à-dire conduite dans le cadre d'une région), cherche à être plus explicative que descriptive, elle a enfin pour but d'éclairer un *diagnostic*, c'est-à-dire la conclusion prospective consécutive à l'analyse des informations recueillies.

Nous verrons les problèmes posés par une telle enquête lors de la collecte des renseignements et de l'interprétation. Nous examinerons en même temps les limites ainsi que les possibilités de cette méthode qui devrait permettre de distinguer les facteurs principaux de la production avec leur importance relative et leurs relations éventuelles.

II. — MÉTHODE

Une telle étude comprend 2 étapes :

— la collecte des données et des renseignements concernant les arbres (rendement, système radiculaire...), le milieu (climat, sol) et les techniques. Elle implique un échantillonnage et nécessite éventuellement des déterminations de laboratoire à partir des prélèvements de sol effectués ;

— le dépouillement dont le but est de rechercher les relations entre le rendement, les facteurs du milieu d'une part, et les facteurs techniques d'autre part, ainsi que celles pouvant exister entre eux.

1° *La collecte des informations*

A — *L'échantillonnage.*

Dans le cas présent on attend de l'échantillon non pas une évaluation valable du rendement moyen en fruits de la population des arbres, mais une explication satisfaisante des différences de rendement par l'intervention des facteurs de production : milieu et technique. Les rendements élevés présentent un grand intérêt parce qu'ils peuvent être dus à des conditions particulières qu'il est important de connaître. Le but de l'enquête n'est pas d'obtenir les relations entre le rendement et les facteurs de production pour un échantillon représentatif de la population totale, mais de trouver les causes des différences de rendement.

Cet objectif conditionne la façon de constituer l'échantillon. Si les points d'observation sont choisis au hasard dans une population où les rendements élevés représentent par exemple 6 p. 100 du total, ceux-ci seront peu représentés dans l'échantillon. La précision sera moindre sur les rendements les plus intéressants. Pour pallier cet inconvénient, on divisera la population en strates et on répartira l'échantillon entre ces diverses strates par tirage au hasard à l'intérieur de chacune d'elle. Le critère de stratification devrait être le niveau du rendement ; comme on ne le connaît pas *a priori* on lui substitue le niveau technique supposé des arboriculteurs.

D'autres difficultés proviennent de la nécessité d'obtenir pour chaque individu de l'échantillon la collection *complète* des renseignements nécessaires. Ceci implique de s'adresser à des arboriculteurs dont on est assuré qu'ils pourront fournir tous ces renseignements. Ceci conduit à éliminer *a priori* un certain nombre de personnes, ce qui introduit un biais dû à ce que l'on ne fait figurer dans l'échantillon que certaines strates d'arboriculteurs (1).

Enfin lors du dépouillement lui-même on peut se heurter à des difficultés de ce genre. Soit un échantillon constitué après stratification des rendements ; le dépouillement de l'enquête nécessite la classification des rendements selon les critères qualitatifs : sols, techniques. Il peut arriver par exemple qu'une technique très efficace mais encore peu répandue soit pratiquée sur trop peu d'arbres de l'échantillon. Si l'on veut étudier cette technique, il faut augmenter dans l'échantillon le nombre d'arbres sur lesquels on la pratique ; ceci revient à prendre en considération un autre critère de stratification en plus du rendement et il peut être nécessaire d'en introduire beaucoup d'autres. Si l'on

(1) Dans un sondage d'opinion par exemple, il peut se produire un phénomène analogue : la plupart des gens refusant de répondre peuvent correspondre à une catégorie particulière de la population.

veut pour étudier des variables quantitatives calculer une régression, l'échantillon constitué par stratification des rendements risque de ne pas être adéquat parce que la distribution de la variable dépendante, à savoir les rendements n'est alors pas normale. La façon de constituer l'échantillon dépend donc de la nature des variables étudiées : si un échantillon est valable pour l'étude des variables qualitatives (classification), il peut ne plus l'être s'il s'agit de variables quantitatives (régression).

L'échantillon doit donc satisfaire à des exigences différentes, qu'il n'est pas toujours facile, et qu'il peut même être impossible, de concilier. Si l'on ajoute à ces considérations celles relatives au temps nécessaire aux observations et à la collecte de renseignements, on constate que l'échantillonnage pose des problèmes particulièrement ardus.

La constitution d'un échantillon *adapté au but de l'enquête* et utilisable de diverses façons (facteurs qualitatif et quantitatif) apparaît comme une tâche difficilement réalisable, mais il importe d'avoir pleinement conscience de ces difficultés pour tendre le plus possible vers le modèle idéal et à défaut tenir compte des imperfections de l'échantillonnage lors de l'interprétation.

B — *Étude des sols et de l'enracinement*

Méthode du profil cultural (S. HÉNIN et *al.*, 1960) adaptée aux arbres fruitiers, et aménagée pour tenir compte de la pente et du défoncement (labour profond avant plantation).

Par rapport au défoncement, on a situé les profils de deux façons, mais toujours à 1 mètre du tronc (1) (fig. 1) :

— profil parallèle au sens du défoncement et donc perpendiculaire à la ligne de plus grande pente passant par le tronc (le défoncement est réalisé sensiblement suivant les lignes de niveau). Le profil ainsi examiné est un plan vertical rectangulaire de 150 cm de long et de 50 à 100 cm de large (compté suivant la verticale). Dans tous les cas, la profondeur du profil dépasse le fond du labour de défoncement de 10 à 15 cm ; quoique la surface du sol soit en pente les parois du trou sont verticales. Les cotes sont mesurées suivant une verticale et la connaissance de la pente permet de les transformer en cotes sur une perpendiculaire à la surface du sol. Ce profil a été utilisé la première année.

— profil de mêmes dimensions disposé perpendiculairement au sens du défoncement. Les cotes sont lues perpendiculairement à la surface du sol. On a utilisé ce type de profil la deuxième année. Il permet d'observer les anciens horizons initiaux sur toute la profondeur du profil.

La première année les profils ont été photographiés.

Dans chaque couche et horizon on a fait des prélèvements aux fins d'analyses :

— granulométrie, méthode internationale,

— carbone total (P. ANNE, 1945),

— carbone libre et lié à la fraction minérale (G. MONNIER, L. TURC et *al.*, 1962),

— stabilité structurale (S. HÉNIN, G. MONNIER et *al.*, 1958) ; lorsque le sol est très sableux on ne considère que l'indice de percolation K,

— point de flétrissement : ressuyage du sol remanié sous pression pneumatique de 16 kg/cm^2,

— capacité au champ : ressuyage du sol remanié sous une pression pneumatique variable selon l'humidité à pF 3 (R. GRAS, 1962),

— détermination éventuelle de l'eau utile des cailloux dans leurs sols d'enrobage (R. GRAS, 1962).

Quelques densités apparentes partielles de terre fine (poids de terre fine dans l'unité de volume de sol caillouteux en place) et de cailloux (poids de cailloux dans l'unité de volume de sol caillouteux en place) ont été déterminées sur le terrain par pelletage suivant une méthode inspirée de celle de J. BOURRIER (1959). La deuxième année, on a mesuré un indice de cailloux de la façon suivante : on remplit un cylindre grillagé de 20 cm de diamètre et 40 cm de hauteur avec de la terre (terre fine et cailloux). Après avoir éliminé la terre fine par secouage, on note la hauteur de cailloux restant dans l'appareil.

La coupe de sol est avivée au couteau de façon que les racines et radicelles dépassent du sol. Les positions de celles-ci sont enregistrées sur du papier quadrillé représentant le profil à échelle réduite. Sur ces relevés on a déterminé en laboratoire :

— l'épaisseur de sol exploitée : différence de cote entre la radicelle la moins profonde et la plus profonde,

(1) A cette distance on est presque assuré de n'observer que les racines de l'arbre étudié. Cette distance est cependant arbitraire par suite de l'extension latérale du système racinaire qui varie avec l'âge et les différentes textures. Nous avons préféré ne pas introduire des corrections dont on ne connaît que le sens mais pas la valeur.

— l'indice de régularité de l'enracinement : rapport du nombre de carreaux de 7 cm de côté contenant au moins une racine au nombre total des carrés.

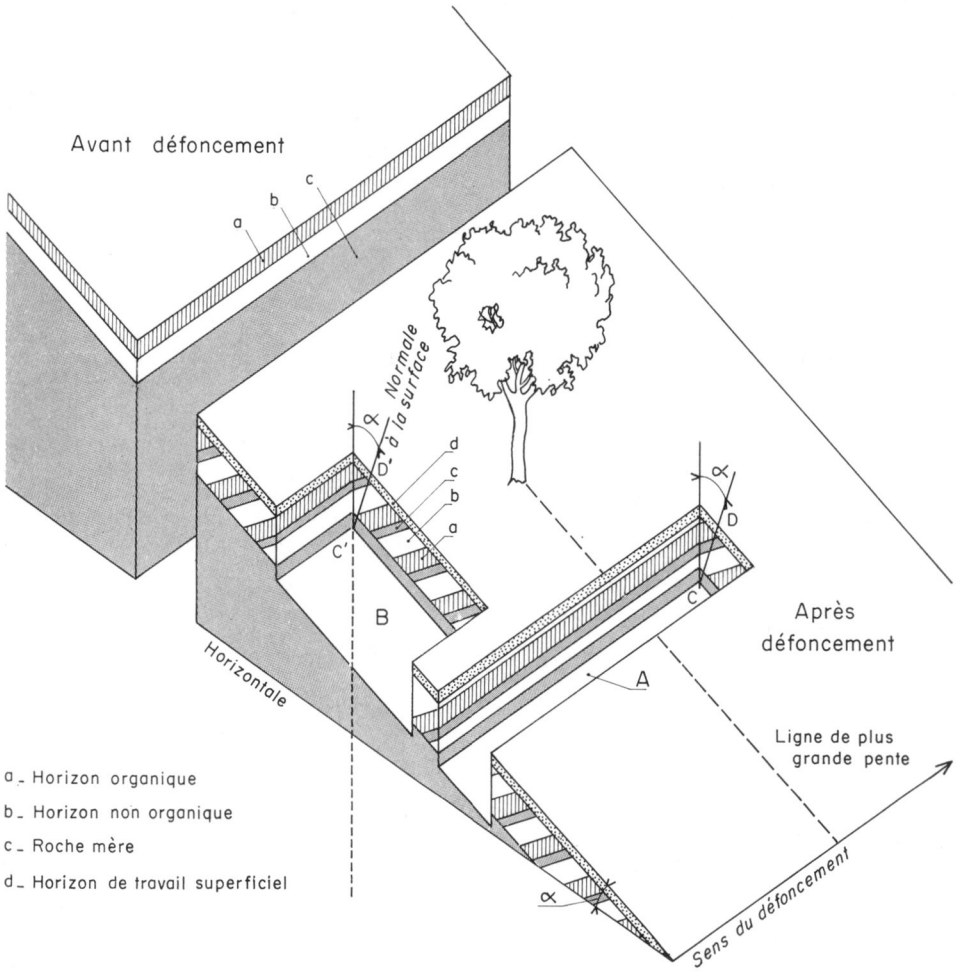


FIG. 1. — *Disposition des horizons en sol défoncé. Différents types de profils*

A — Profil parallèle au sens du défoncement. Les cotes lues sur des verticales doivent être projetées sur des normales à la surface telles que CD.

B —Profil perpendiculaire au sens du défoncement. Les cotes sont lues directement sur des normales telles que C′ D′.

C — *Étude de la partie aérienne de l'arbre.*

L'étude de la partie aérienne des arbres a consisté à mesurer les rendements, la circonférence du tronc à 30 cm du sol, et la surface de la section de la frondaison par un plan vertical passant par le tronc, mesurée sur un cliché de l'arbre.

D — *L'étude des techniques* s'est poursuivie par enquête auprès des exploitants :

fertilisation (N, P, K.),
apport de matière organique,
irrigation,
travail du sol.

2° *Le dépouillement*

Il requiert une attitude inverse de celle de l'expérimentation : au lieu d'observer les différences de rendement consécutives à la mise en jeu de facteurs contrôlés, on cherche les raisons possibles des différences de rendement constatées. Le dépouillement de l'enquête se fait essentiellement de trois façons.

A — *Classification de l'ensemble des rendements selon des critères qualitatifs.*

Il peut s'agir de types de sol, de techniques... ou plus exceptionnellement de classes de valeurs quantitatives (classes de fumure azotée).

Le principe est d'examiner si les sous-ensembles ainsi délimités sont statistiquement différents.

Le fait que l'ensemble des rendements soit classé successivement suivant plusieurs critères (par types de sol S_1 S_2 S_3, par technique T_1 T_2) aboutit éventuellement à de sérieuses difficultés dont nous allons donner deux exemples :

a) Les actions de facteurs tels que S et T peuvent ne pas être additives (la technique T_2 a une action différente sur S_1 et S_2), il y a interaction entre S et T. Si l'on compare les rendements sur 2 sols S_1 et S_2, pour partie irrigués et non irrigués et que l'irrigation soit plus efficace sur S_2, la comparaison des moyennes par sol n'a guère de sens puisqu'elle traduit une somme d'effets « sols » qui sont différents en présence ou en absence d'irrigation.

b) Mais, même si les effets de S et de T sont additifs, des biais peuvent s'introduire du fait de l'échantillonnage ou de la constitution même de la population. Par exemple si l'irrigation que l'on sait être efficace est pratiquée surtout sur le sol S_2, on risque d'attribuer au type de sol une partie de l'effet de l'irrigation. Si l'irrigation est pratiquée dans la même proportion sur les 2 sols, il peut y avoir un biais analogue si par exemple, une fois l'échantillon constitué, la proportion du sol irrigué est plus forte dans S_1 que dans S_2 (1).

La seule façon d'éviter les inconvénients précédents est de *comparer l'effet d'un facteur pour chaque niveau de l'autre* (comparer sols S_1 et S_2 sans, puis avec irrigation) *ou de la combinaison des autres s'il y a plus de deux facteurs.* Ceci nécessite *un échantillon important* de façon à pouvoir comparer encore les sous-ensembles plus réduits résultant de la classification à plusieurs niveaux de l'échantillon (fig. 2).

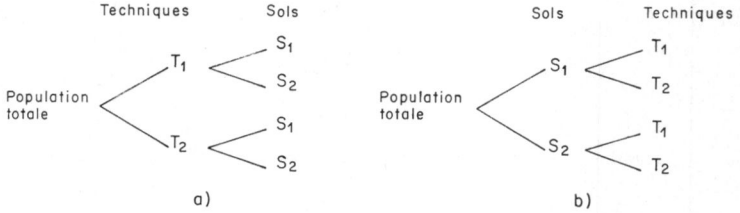


FIG. 2. — *Comparaisons homologues*
a) Étude de l'effet « sol » pour la technique T_1 puis la technique T_2
b) Étude de l'effet « Technique » sur le sol 1 puis le sol 2

Le problème essentiel de l'étude des facteurs qualitatifs est de s'assurer que les sous-ensembles correspondant aux divers états d'un certain facteur sont réellement homologues pour ce qui est des autres facteurs de variation possible.

Une difficulté d'un autre ordre provient de ce que l'âge des arbres n'est pas le même. On considère alors avantageusement les courbes $R = f(t)$ où R = rendement, t = âge. Si ces courbes sont assimilables à des droites, ou peuvent le devenir à la suite d'une anamorphose adéquate, on compare leurs coefficients de régression. La comparaison n'est valable que si la répartition des âges est analogue dans chacun des sous-ensembles considérés (fig. 3).

B — *Table de contingence* dressée pour les données de fréquence et permettant d'établir des liaisons entre 2 facteurs.

C — *Calcul d'une régression multiple entre le rendement R et les variables quantitatives* x_i.

Un modèle mathématique du type

$$R = a_1x_1 + a_2x_2 + \cdots + a_ix_i + a_nx_n + b$$

(1) Il faudrait donc que dans l'échantillon les proportions des rendements obtenus avec irrigation ne soient pas significativement différentes dans les sous ensembles S_1 et S_2, ce qui se vérifie par un calcul de χ^2.

qui suppose que chaque variable *intervient linéairement* et que *l'action de ces variables est additive*, tient compte des liaisons éventuelles pouvant exister entre les variables x_i pour évaluer les coefficients de régression.

Lorsque les variables x_i ne sont pas liées entre elles on peut tester l'influence de chacune d'elles de *façon indépendante* par analyse de variance ; on ne conserve ainsi dans l'équation que les x_i en liaison avec R. Les coefficients de régression a_i sont des estimations non biaisées des valeurs réelles.

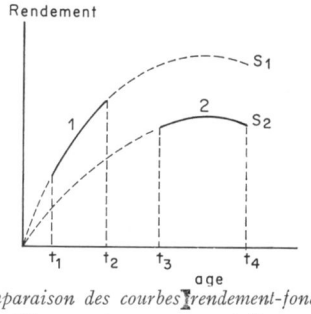


FIG. 3. — *Comparaison des courbes rendement-fonction du temps*
Les échantillons 1 et 2 ne peuvent être comparés
puisqu'ils correspondent à des intervalles d'âges différents

Le plus souvent, les variables x_i sont en corrélation entre elles et il n'est alors plus possible de *tester une variable indépendamment des autres*. Les résultats de l'analyse de variance sont alors contingents de l'ordre d'introduction des variables : par exemple les seuils de signification peuvent être différents selon qu'on teste x_1 puis x_2 compte tenu de x_1, ou x_2 puis x_1 compte tenu de x_2. Nous montrons sur un exemple simple comment a été fixé pour ce travail le choix de l'ordre des variables. Par exemple pour 3 variables x_1 x_2 x_3, on classe par ordre décroissant les termes régressions multiples à (3 — 1) variables :

$$\text{reg } x_2x_3 > \text{reg } x_1x_2 > \text{reg } x_1x_3$$

Avec les variables présentes dans le terme le plus élevé on classe par ordre décroissant les termes régressions à (3 — 2) variables, ce qui revient à considérer comme moins importante la variable x_1 non retenue.

$$\text{reg } x_2 > \text{reg } x_3$$

L'analyse de variance progressive proprement dite consiste à tester successivement les variables dans l'ordre x_2 x_3 x_1 précédemment défini :

reg x_2
reg x_3, compte tenu de x_2
reg x_1, compte tenu de x_2 et de x_3

Pour qui se préoccupe de l'ensemble des liaisons existant dans le milieu, un des inconvénients résultant de la liaison entre les x_i est une incertitude dans les conclusions obtenues : si les variables x_i conservées au terme de l'analyse de variance sont en liaison avec R, les variables ont pu être rejetées parce que leur influence sur R est prise en compte par une ou plusieurs des variables retenues. Quoique ne figurant plus dans l'équation ces variables interviennent indirectement sur R. L'examen des corrélations existant entre la variable R et les x_i et entre les x_i permet d'éviter les erreurs grossières et de dresser un schéma approximatif des liaisons existantes. Ajoutons enfin que d'un autre point de vue, des variables ont pu se trouver rejetées parce qu'elles intervenaient sur R d'une façon non linéaire ou non additive ($R = ax_1x_2 + b$ au lieu de $R = a_1x_1 + a_2x_2 + b$)

III. — PRÉSENTATION DES RÉSULTATS BRUTS DE L'ENQUÊTE ET DU SCHÉMA D'INTERPRÉTATION

Les arbres ont été choisis parmi les variétés de pêche tardive, essentiellement *J. H. Hale*, greffés sur franc. Ce choix a été orienté par les niveaux techniques des exploitants, élevés et moyens (conseils donnés par les techniciens de la Chambre d'Agriculture), par le souci de couvrir l'ensemble

de la gamme de texture de la zone et d'avoir une répartition homogène des arbres pour toutes les classes d'âge.

On dispose de l'ensemble des notations pour 59 arbres.

Nous allons faire une description rapide des caractéristiques des diverses variables dans l'échantillon collecté avant d'indiquer le schéma d'interprétation adopté.

1° *Les résultats*

A — *Le milieu.*

— Altitude : 400 à 650 m.

— Pente : pourcentage des arbres plantés sur une pente P p. 100

P <	5 p. 100	48 p. 100
5 < P <	15 p. 100	33 p. 100
P >	15 p. 100	19 p. 100

Texture :	sols sableux	41 p. 100
	sols sablo-limoneux	47 p. 100
	sols sablo-argileux	12 p. 100

Sur 40 analyses granulométriques de l'horizon superficiel :

90 p. 100 des sols sont constitués de moins de 10 p. 100 d'éléments inférieurs à 2 μ
64 p. 100 sont constitués de plus de 60 p. 100 d'éléments supérieurs à 2 mm

— Taux de cailloux :

50 p. 100 des sols sont peu caillouteux
33 p. 100 sont assez caillouteux
17 p. 100 sont très caillouteux

B — *Les techniques.*

— Irrigation. Parmi les vergers étudiés, 26 sont irrigués et 33 ne le sont pas. La dose moyenne annuelle d'irrigation est de 220 mm (25 à 565 mm).

— Densité de plantation

Nombre d'arbres à l'ha	500	625	815	950	> 1 500	Moyenne
Vergers irrigués.....	—	94 %	6 %	—	—	769
Vergers non irrigués	3 %	67 %	9 %	6 %	15 %	625

— Précédents culturaux

Précédents	Prés	Vergers ou vignes	Friches ou bois	Polyculture
Vergers non irrigués (%)..	18	0	18	64
Vergers irrigués (%)	19	4	0	77

— Labour de défoncement

Profondeur du labour de défoncement (cm)	0 (%)	0-40 (%)	41-50 (%)	51-60 (%)	61-70 (%)	71-80 (%)	Moyenne (cm)
Vergers non irrigués.....	3	9	24	37	15	12	60,5
Vergers irrigués	0	19	19	19	8	35	56,8

— Les travaux d'entretien du sol :

un labour d'automne qui chausse les arbres,
un labour de déchaussage au printemps,
60 p. 100 des exploitants font plus de 4 passages de canadien.

— Fumure organique.

Apport de fumier	Avant la plantation		En entretien	
	Sans apport	Avec apport	Sans apport	Avec apport
Vergers non irrigués (%)..	73	27	48	52
Vergers irrigués (%)	62	38	3,8	96,2

La moyenne annuelle des apports de fumier en entretien varie de 7 à 20 tonnes à l'hectare avec une moyenne de 13,8 t/ha pour les vergers non irrigués et de 10 à 30 t/ha avec une moyenne de 13,5 t/ha pour les pêchers irrigués.

— Fertilisation.

Les apports phosphopotassiques de fond sont rares, 14 p. 100 des vergers ont reçu du phosphore à la plantation, 2 p. 100 ont reçu de la potasse.

Apports d'entretien en g/arbre/an	Azote				Phosphore				Potasse			
	0-50 (%)	50-200 (%)	> 200 (%)	Moy. g/arbre	0-50 (%)	50-200 (%)	> 200 (%)	Moy. g/arbre	0-50 (%)	50-200 (%)	> 200 (%)	Moy. g/arbre
Vergers non irrigués	30	51	19	66	27	50	23	184	22	60	18	78
Vergers irrigués	40	37	23	100	38	58	4	65	29	60	11	76

— Épaisseur de sol exploitée par les racines :

	Épaisseur exploitée en cm	
	Moyennes	Extrêmes
Pêchers non irrigués.....	47	28-75
Pêchers irrigués	42	22-60

C — *Les rendements et les caractéristiques des arbres.*

Les rendements sont calculés en t/ha à partir du rendement mesuré sur l'arbre observé.
Les rendements, la circonférence du tronc et la section de couronne pouvant varier avec l'âge, nous donnons leurs valeurs moyennes par classe d'âge.

Classe d'âge	Rendements (t/ha)		Circonférence du tronc (cm)		Section de couronne (dm²)	
	irrigués	non irrigués	irrigués	non irrigués	irrigués	non irrigués
< 5 ans	15,2	13,2	27	23	61	288
6-10	19,0	15,5	28	30	315	404
11-15.....	16,8	17,3	36	33	379	365
> 15.....	16,2	—	33	—	322	—
Total.	17,5	15,3	32,3	27,6	347	347

— Age : pour les arbres non irrigués, la moyenne d'âge est de :
7,3 ans (3 à 14 ans)

pour les arbres irrigués, la moyenne d'âge est de :
11,2 ans (4 à 20 ans).

— Indice de régularité de l'enracinement.

	Indice de régularité	
	Moyennes	Extrêmes
Pêchers non irrigués.....	0,35	0,19-0,58
Pêchers irrigués	0,45	0,13-0,86

2° *Le schéma d'interprétation*

Il résulte des principes énoncés précédemment et de la présentation des variables effectuée ci-dessus.

A — *Variables non étudiées.*

Lorsque les variables quantitatives présentent un intervalle de variation faible ou la même valeur pour un pourcentage élevé des observations, elles ne sont pas étudiées. Sont dans l'un ou l'autre de ces cas : l'altitude, le nombre de travaux d'entretien du sol, la densité de plantation pour les sols non irrigués. Les facteurs qualitatifs ne sont pas étudiés lorsque les effectifs de certaines classes sont trop faibles : précédents culturaux.

B — *Facteurs importants nécessitant une classification de l'échantillon.*

Leur importance *a priori* est telle qu'on ne doit étudier les autres facteurs qu'à un niveau fixé de celui-ci : irrigation, densité de plantation pour les sols irrigués seulement, fumure azotée. L'apport

TABLEAU I

Comparaison des arbres irrigués et non irrigués (Profils parallèles)
(sont données dans l'ordre les valeurs minima, moyenne et maxima des variables)

Effectif	Irrigués		Non irrigués
	26	20 (1)	33
Rendement (t/ha)	10,6 *17,5* 28,1		7,0 *15,3* 22,0
Age (an)	4,0 *11,2* 20,0		3,0 *7,3* 14,0
Circonférence du tronc (cm)	25,5 *32,2* 45,0		21,5 *27,6* 39,0
Section de couronne (dm^2)	110,0 *347,0* 630,0		200,0 *347,0* 630,0
Épaisseur de sol exploitée (cm)	15,0 *40,2* 65,0	22,0 *42,0* 60,0	28,0 *47,0* 75,0
Indice de régularité de l'enracinement	0,13 *0,45* 0,86	0,21 *0,43* 0,72	0,19 *0,35* 0,58
Profondeur de défoncement (cm)	40,0 *56,8* 90,0	40,0 *55,9* 75,0	20,0 *60,5* 80,0
Pente (%)	0,0 *8,7* 35,0		0,0 *5,8* 16,0
Densité de plantation (arbres/ha)	500,0 *769,0* 1 190,0		*625,0*
N (kg/ha)	0,0 *100,0* 379,0		0,0 *66,0* 150,0
P_2O_5 (kg/ha)	0,0 *64,7* 140,0		0,0 *83,6* 200,0
K_2O (kg/ha)	0,0 *76,2* 281,0		0,0 *78,4* 150,0

(1) Mesures correspondant à une observation sur profil perpendiculaire au sens du défoncement.

organique en entretien n'a pas été retenu à cause de la mauvaise connaissance par les exploitants de la quantité et des dates des apports.

C — *Facteurs qualitatifs.*

Texture et excès d'eau. Aucun des arbres poussant dans des situations présentant un excès d'eau n'a été pris en considération pour l'étude des autres facteurs. Les arbres recevant un apport nul de fumier ont été comparés aux autres.

D — *Facteurs quantitatifs.*

Ils ont été étudiés au moyen de 2 régressions multiples calculées l'une pour les sols irrigués et l'autre pour les sols non irrigués. Il n'est en effet pas souhaitable de regrouper dans un même ensemble les sols recevant une quantité d'eau d'irrigation variable et ceux n'en recevant pas. Dans ces 2 sous-ensembles on a considéré les mêmes variables que nous énumérons dans le tableau 1 en donnant leurs intervalles de variation et leurs moyennes. Les gammes de variation différentes pour l'âge incitent à une certaine prudence dans la comparaison des résultats des deux régressions.

Pour les arbres irrigués, varient à la fois l'apport d'eau moyen annuel et l'époque depuis laquelle on pratique l'irrigation. Dans une démarche analytique nous considérons séparément un indice pour chacune de ces variables au lieu de les combiner en un seul. L'indice i_1 est le $\log_{10} \frac{\text{apport annuel moyen d'eau}}{\text{déficit annuel moyen}(1)}$, le logarithme ayant été adopté pour traduire l'efficacité décroissante des apports d'eau lorqu'ils se rapprochent de la valeur du déficit ou le dépassent et tester séparément les deux termes du rapport. L'indice i_2 est : $\frac{\text{nombre d'années d'irrigation}}{\text{âge de l'arbre.}}$

IV. — PRÉSENTATION DE LA RÉGRESSION MULTIPLE (2)

L'objectif est de déterminer l'influence sur le rendement des facteurs du milieu, des facteurs techniques et des caractéristiques propres à l'arbre. Comme ces facteurs peuvent être en corrélation entre eux, on peut craindre qu'à la fin de l'analyse de variance progressive, des termes de milieu disparaissent parce qu'une caractéristique de l'arbre, la circonférence du tronc par exemple, traduit leur influence :

R étant le rendement et c la circonférence du tronc, si :

$R = f$ (milieu)

$c = g$ (milieu)

f et g étant des fonctions des facteurs du milieu,

la régression $R = h$ (c, milieu)

peut se réduire à $R = i$ (c), la circonférence du tronc transmettant au rendement l'effet du milieu :

$$\text{milieu} \rightarrow c \rightarrow R$$

Pour éviter la perte d'information précédente on vérifie, si une fois tenu compte de l'action du milieu, c améliore l'évaluation de R, ce qui revient à tester les significations du terme :

régression (c, milieu) — régression (milieu).

(1) Déficit annuel moyen : évapotranspiration potentielle moyenne de la zone moins pluviométrie moyenne de la zone moins capacité de réserve en eau au point considéré calculée sur l'épaisseur exploitée.

(2) Le Service de Biométrie de Versailles a eu une double contribution à l'élaboration de ce chapitre ; M. ARNOUX a d'une part collaboré à la mise au point de la méthode d'analyse statistique envisagée ; son service a d'autre part réalisé les calculs correspondants.

Ceci amène à classer les variables en deux groupes :

x_i : relatives au milieu et aux techniques

y_i : relatives à l'arbre.

Variables x_i : milieu et techniques		Variables y_i	
Pente	x_1	Age	y_1
Indice du taux de cailloux	x_2	Circonférence du tronc	y_2
Profondeur de défoncement	x_3	Section couronne	y_3
Densité de plantation	x_4	Épaisseur du sol exploité par les racines	y_4
Dose annuelle d'irrigation	$x_5 = \log_{10}$ apport annuel moyen d'eau	Indice de régularité de l'enracinement	y_5
Déficit en eau	$x_6 = \log_{10}$ déficit annuel moyen		
Ancienneté de l'irrigation	x_7		
Fumure azotée	x_8		
phosphatée	x_9 } doses annuelles		
potassique	x_{10}		

Parmi les variables concernant l'arbre, certaines sont d'un type particulier, ce sont l'épaisseur exploitée et l'indice de régularité de l'enracinement en principe liés surtout au sol et donc au milieu.

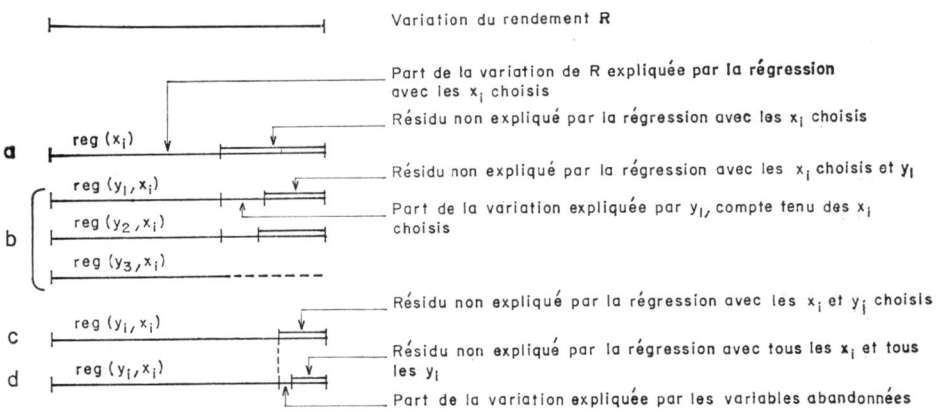


FIG. 4. — *Représentation schématique des diverses phases du calcul*

x_i, y_i = ensemble des variables
(x_i, y_i) = variables retenues au terme de la phase en question ou résultant du choix fait lors des phases précédentes.

a) Choix des variables « milieu, techniques » : x_i
b) Valeur explicative de chacune des variables « arbre » : y_i
c) Choix définitif des variables « milieu, techniques, arbre ».
d) Vérification : la variation expliquée par les variables abandonnées ne doit pas être significative.

Le déroulement des calculs peut être schématisé comme suit (fig. 4) :

a) choix des variables x_i (milieu, techniques) expliquant une partie de la variation de R, par analyse progressive après choix de l'ordre des variables (cf. p. 10). Comme le résidu non expliqué n'est pas minimum (les variables y_i qui ne sont pas encore introduites peuvent réduire ce résidu) on procède à l'élimination des variables seulement lorsque le test F est très faible.

b) examen de la valeur explicative des variables y_i (arbre), par test de signification des expressions :

régression $(y_1, x_1 \cdots x_i \cdots)$ — reg $(x_1 \cdots x_i \cdots)$
régression $(y_2, x_1 \cdots x_i \cdots)$ — reg $(x_1 \cdots x_i \cdots)$
.....etc.

Les variables x_i sont celles conservées au terme de l'opération précédente. On ne rejette les variables y_i que lorsque les tests F des expressions ci-dessus sont très faibles.

c) Choix définitif des x_i et y_i retenus provisoirement en *a* et *b*, au moyen d'une analyse progressive.

d) vérification qu'aucune variable utile n'a été éliminée indûment dans les phases précédentes. Ceci s'effectue en testant la signification de l'expression :

régression (tous les x_i, tous les y_i) — reg (x_i choisis, y_i choisis).

Dans le cas de variables dont l'effet peut se traduire par une courbe et non par une droite on examine si l'introduction d'un terme quadratique (ajustement parabolique) augmente significativement la variation expliquée.

Nous donnons les analyses de variance progressives finales après choix des variables et les équations de régression. Nous rappelons que dans une telle analyse on examine la signification de chaque terme compte tenu des variables déjà introduites précédemment.

Pêchers non irrigués.

Analyse progressive de variance de la régression multiple après choix des variables.

Variation	Variance	*dl*	F	P
Rendement R.....	15,09	32		
âge	54,30	1	4,37	< 5,0 %
indice cailloux	34,54	1	2,78	< 20 % (1)
pente	33,97	1	2,73	< 20 % (2)
Résidu	12,41	29		

P = probabilité pour que la liaison soit le seul fait du hasard (3).

L'équation de régression est :

$$R = 0{,}491\, y_1 - 0{,}292\, x_1 - 1{,}480\, x_2 + 15{,}944$$

avec les intervalles de variation suivants :

$7 < R < 22$	rendement (t/ha)
$3 < y_1 < 14$	âge de l'arbre (an)
$0 < x_1 < 16$	pente (%)
$1 < x_2 < 33$	indice cailloux

La régression multiple explique 17,8 p. 100 de la variance de R.

(1) La probabilité interpolée est de 11,5 p. 100.
(2) La probabilité interpolée est de 11,2 p. 100.
(3) Dans la suite du texte, le mot probabilité sera employé avec ce sens.

Pêchers irrigués (Profil perpendiculaire au défoncement).

Analyse progressive de variance de la régression multiple après choix des variables.

Variation	Variance	*dl*	F	P
Rendement R.....	22,25	19		
épaisseur exploitée.....	114,67	1	14,97	< 1 %
déficit en eau	101,47	1	13,25	< 1 %
section de frondaison.....	31,89	1	4,16	< 10 %
défoncement (linéaire et quadratique)	33,82	2	4,41	< 5 %
défoncement linéaire	24,41	1	3,18	< 10 %
défoncement quadratique	43,23	1	5,64	< 5 %
Résidu	7,65	14		

L'équation de régression est :

$$R = 0{,}326\, y_4 + 41{,}153 \log x_6 + 0{,}013\, y_3 - 1{,}893\, x_3 + 0{,}015\, (x_3)^2 - 31{,}70$$

avec les intervalles de variation suivants :

$10{,}6 < R < 28{,}1$	rendement (t/ha)
$22{,}0 < y_4 < 60{,}0$	épaisseur de sol exploitée (cm)
$108{,}0 < x_6 < 181{,}0$	déficit en eau (mm)
$110{,}0 < y_3 < 630{,}0$	section de couronne (dm^2)
$40{,}0 < x_3 < 75{,}0$	profondeur de défoncement (cm)

La régression multiple explique 65,6 p. 100 de la variance de R.

V. — ÉTUDE DES FACTEURS DE LA PRODUCTION

A. — *Les caractéristiques de l'arbre*

Pour les arbres non irrigués la seule variable « arbre » apportant un supplément d'information sur le rendement une fois tenu compte de l'effet milieu et technique, est l'âge.

Parmi les variables arbre rejetées, la section de couronne et l'épaisseur exploitée sont vraisemblablement sans liaison avec le rendement puisque leurs corrélations avec ce dernier sont très faibles. Quant à la circonférence du tronc pour laquelle la corrélation simple avec le rendement est élevée, elle n'a pas d'influence spécifique, mais peut transmettre des effets de milieu et des techniques sur le rendement.

Lorsque les arbres sont irrigués, la section de couronne et l'épaisseur exploitée apportent une information supplémentaire compte tenu du milieu et des techniques. Il est vraisemblable que la circonférence du tronc et l'âge sont sans aucun effet sur le rendement : coefficient de corrélation simple très faible. L'intervention de la section de couronne, peut traduire un effet indirect, des techniques de taille par exemple (variable « technique » non introduite dans la régression), mais aussi le fait que la section de couronne, dépendant plus des conditions de l'année, sa liaison avec le rendement en 1966 soit plus étroite.

B. — *La pente*

Les vergers de pêchers sont établis sur des terrains dont les pentes, souvent fortes, peuvent atteindre 35 p. 100. Ceci s'explique par le fait que le pêcher, d'implantation récente, est venu compléter un système traditionnel de polyculture et d'élevage qui a subsisté dans les terrains plats. Les vergers sont installés le plus souvent dans des zones en pente occupées autrefois par des prés, des cultures ou des bois de pins ou de châtaigniers. La pente rend les travaux difficiles et expose les sols à l'érosion. Une étude de l'érosion dans ces vergers a été entreprise par ailleurs (DEFFONTAINES et de MONTARD, 1968) d'où il ressort l'importance du départ de la terre : celui-ci croît lorsque la pente augmente et décroît avec le taux de cailloux en surface. L'érosion est favorisée par l'existence de pluie journalière exceptionnellement abondante (177 mm le 3 août 1963) ; toutes les précipitations journalières supérieures à 70 mm (2 jours par an en moyenne) sont situées du mois de juin au mois de septembre.

Les pentes exprimées en p. 100 ont été introduites comme variables quantitatives caractérisant le milieu dans la régression multiple. Dans le cas des vergers non irrigués la pente intervient dans l'équation de régression à une probabilité de 11,2 p. 100.

On peut penser que cette relation pente-rendement deviendra de plus en plus grande au cours des années à venir ; en effet les vergers étudiés en sont à leur première génération et ont été installés sur des parcelles où l'érosion était limitée ou inexistante du fait de la couverture végétale (prairie, forêt) ; il s'ensuit que les effets de l'érosion (d'autant plus importants que la pente est grande) ne se sont faits que peu sentir sur les arbres.

C. — *La constitution physique des sols*

Les sols se sont formés à partir de deux grands types de roche-mère (granite ou granite gnéissique et schiste feldspathisé) ou de colluvions ou alluvions issues de celles-ci et souvent mélangées à des matériaux d'autres origines. La teneur en cailloux est en général élevée.

Nous n'avons pas constaté de liaison entre les classes de teneur en cailloux et les classes de texture, certainement parce que la teneur en cailloux dépend essentiellement de la profondeur de sol initial et des conditions de défoncement.

a) *La texture.*

L'examen des courbes granulométriques révèle l'existence de deux grands groupes de sol (fig. 5) :

— les sols sableux formés essentiellement à partir de la roche éruptive en place sont peu influencés par la nature de celle-ci : la fraction 50-200 μ augmente au détriment de la fraction 200-2 000 μ lorsqu'on passe des granites aux schistes. Nous avons distingué assez arbitrairement les sols comportant moins de 15 p. 100 (type 1) et plus de 15 p. 100 (type 2) de la fraction 50-200 μ.

— les sols sablo-argileux (type 3) le plus souvent d'origine colluviale sont définis par rapport aux types 1 et 2 par une teneur en argile supérieure à 10 p. 100.

La comparaison des courbes rendement-âge et circonférence du tronc-âge n'a pas été possible faute d'effectifs suffisants, du fait qu'on a dû d'abord considérer les

sous-populations non irriguées (effectif 33) et irriguées (effectif 26). Sans même procéder à d'autres classifications qui auraient été en toute rigueur nécessaires (par classes d'apport d'azote notamment) on dispose seulement pour les sols non irrigués de 14 arbres pour le type 1, 12 pour le type 2 et 7 pour le type 3. De fait les figures ne montrent pas de différence. Pour les sols irrigués les effectifs de chaque groupe de sol sont encore plus faibles : type 1 : 9 — type 2 : 13 — type 3 : 4. Les figures ne permettent pas de déceler de différences. Ceci illustre les difficultés de procéder à l'analyse des facteurs qualitatifs même avec un échantillon initial assez important (59) lorsqu'on est obligé de faire des comparaisons dans les sous-classes résultant de plusieurs critères de classification.

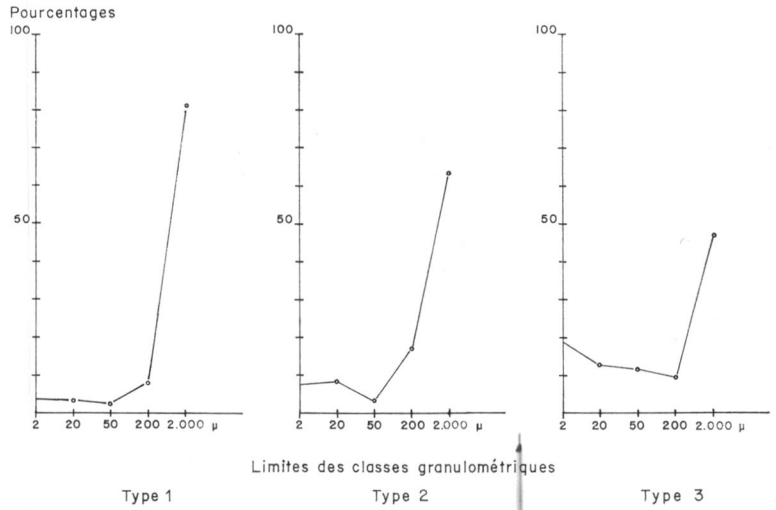


FIG. 5. — *Principaux types de sols*

b) *La quantité de cailloux.*

A la suite du défoncement, de grandes quantités de cailloux ont été mélangées à la terre fine.

Nous nous sommes bornés pour les arbres non irrigués à distinguer 3 classes de teneur en cailloux : faible, moyenne, élevée, numérotées respectivement 1, 2, 3 et déterminées par examen de photographies de profil. Quelques mesures donnent une idée du poids de cailloux exprimé en pourcentages pondéraux de la somme : terre fine + cailloux :

classe élevée	40 et 89
classe moyenne	35
classe faible	28 et 4

Les numéros de classement ont été introduits comme variables quantitatives dans la régression multiple. Ces numéros sont en liaison négative (coefficient de régression partielle — 1,48 t pêche/ha/unité d'indice) à une probabilité de 11,5 p. 100. La quantité de cailloux a donc un effet dépressif sur le rendement.

Pour les arbres irrigués on a introduit dans les régressions les numéros de classement ou un indice provenant de la mesure du volume des cailloux à l'aide d'un panier-tamis. Il n'y a aucune liaison significative à un seuil inférieur à 20 p. 100.

Il semble donc que l'effet dépressif de la présence des cailloux ne se manifeste qu'en l'absence d'irrigation ; nous verrons plus loin une explication plausible de l'effet dépressif basée sur la diminution de la capacité de réserve, ce qui se trouverait aussi en accord avec l'absence d'influence des cailloux en sol irrigué.

Dans la région, la teneur en cailloux est un élément important de la constitution du sol. Il n'est donc guère surprenant qu'on n'ait pu mettre en évidence des écarts de rendement selon que les arbres poussent sur les types de sol 1 ou 2 différenciés par la granulométrie de la terre fine. Ceci n'implique pas que sur les sols sablo-argileux du type 3 les arbres n'aient pas un comportement différent, mais il est difficile de le faire apparaître vu le faible nombre d'arbres disponibles dont une partie est dans des conditions particulières (mouillères).

D. — *Les propriétés structurales* (fig. 6)

Les sols sableux présentent souvent une structure continue légèrement cohérente lorsqu'ils sont secs. Cette tendance à la prise en masse est confirmée par des indices de percolation (log 10 K) souvent assez faibles : 45 p. 100 des valeurs sont

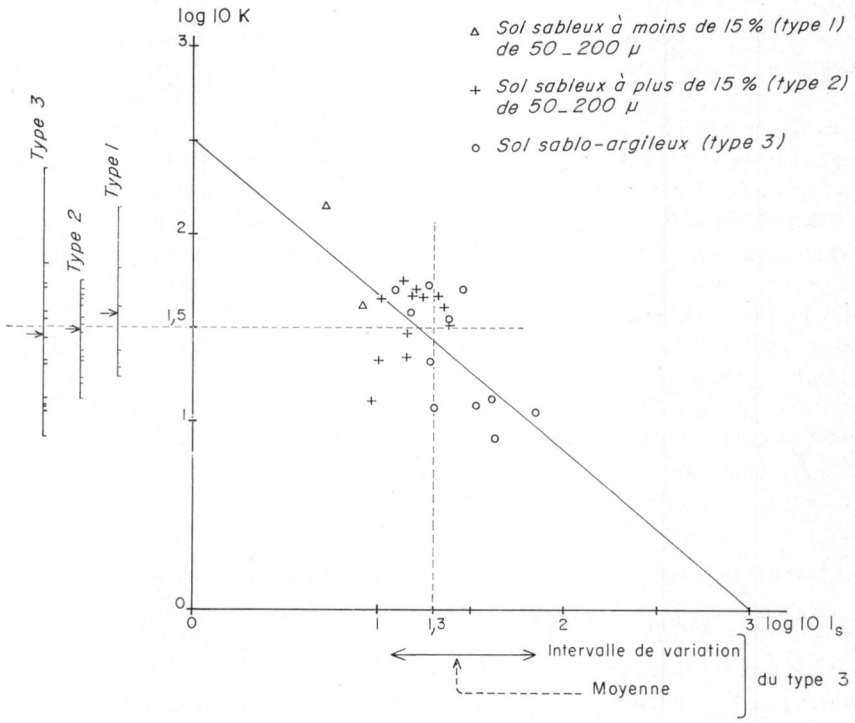


FIG. 6. — *Indices de stabilité structurale des 3 types de sols*

L'indice log 10 K étant le plus intéressant pour les sols sableux, on a réalisé surtout des mesures de cet indice : celles-ci sont portées à gauche du graphique sur des segments parallèles à l'axe de log 10 K, limités par les valeurs extrêmes. Noter pour les sols de type 3 l'importance de l'intervalle de variation des 2 indices.

inférieures à 1,50. Il n'y a pas de différence nette entre les sols sableux selon qu'ils comportent plus ou moins de 15 p. 100 d'éléments 50-200μ. Les propriétés structurales de ces sols sont donc seulement médiocres à moyennes et ceci malgré un labour de défoncement. Au voisinage de la roche-mère on ne trouve pas à proprement parler un sol mais une arène très grossière.

Les sols sablo-argileux ont des structures plus nettement caractérisées, soit continues, soit fragmentaires. Leurs stabilités structurales accusent des variations importantes. 53 p. 100 des log 10 K mesurés sont inférieurs à 1,50 — 55 p. 100 des log 10 I_s dépassent 1,30 ; la moitié environ de ces sols possèdent donc des stabilités structurales mauvaises qui peuvent être cause d'accidents pour les arbres, si elles sont combinées à un excès d'eau.

En définitive si une partie des sols sablo-argileux ont des propriétés structurales très défavorables, les sols sableux quoique en général de meilleure qualité sont loin de ne présenter aucun inconvénient en particulier du fait de leur structure continue légèrement cohérente.

E. — *La matière organique*

Les modalités d'action de la matière organique sont différentes en arboriculture et en polyculture. En polyculture, la matière organique est mélangée par le labour à la couche de sol où se trouvera par la suite une grande partie des racines de la plante ; l'opération équivalente en arboriculture est l'incorporation de matière organique au sol lors du défoncement. Les apports faits par la suite, en entretien du verger, concernent essentiellement la couche superficielle de sol très peu exploitée par les racines parce que travaillée et soumise à des conditions climatiques trop extrêmes (humidité, température). Le rôle de ces apports d'entretien se limite donc essentiellement en ce qui concerne les propriétés physiques à leur maintien ou à leur amélioration dans la couche de surface. Son bon état est nécessaire à l'infiltration de l'eau et à l'aération du sous-sol. Dans la mesure où les propriétés physiques de cette couche de surface sont convenables ou ne se dégradent que lentement, les apports organiques en entretien, peuvent apparaître comme sans effet sur les arbres.

La matière organique est susceptible de modifier le caractère assimilable des éléments comme P et K et par sa minéralisation elle intervient également dans l'alimentation minérale.

Dans ce qui suit, nous considérons uniquement des sols non irrigués, l'influence de l'irrigation sur la dynamique de la matière organique pouvant difficilement être mise en évidence par voie d'enquête parce que les doses sont très variables et que l'irrigation est pratiquée depuis des époques très différentes.

1° *Taux moyen et évolution de la matière organique dans les diverses couches.*

a) *Anciens horizons initiaux.*

Actuellement inclinés du fait du défoncement, ils ne reçoivent pas d'apports organiques si l'on néglige ceux provenant éventuellement des produits humiques solubles issus du fumier apporté en surface.

Parmi ces couches inclinées l'ancien horizon superficiel a une teinte plus sombre que les anciens horizons sous-jacents ; cette différence de couleur correspond à une

différence du taux de matière organique totale comme on a pu le vérifier sur 9 profils (différence significative au seuil 5 p. 100).

Nous allons considérer maintenant uniquement les anciens horizons superficiels qui, plus riches en matière organique, se prêteront plus facilement à une étude d'évolution. On prend en considération les figures portant, en fonction du temps écoulé depuis le défoncement (sensiblement l'âge de l'arbre) le carbone de la matière organique totale, de la matière organique libre et de la matière organique liée (assimilable à l'humus en première approximation). On a distingué les précédents culturaux : polyculture, prairie, forêt et désigné à côté de chaque point le type de sol et l'apport organique avant la plantation (présence ou absence).

L'examen des figures révèle les points suivants (fig. 7) :

— matières organiques totale et liée : les valeurs obtenues pour les vergers sur prairie sont supérieures à celles des vergers sur polyculture (moyenne pour la matière organique totale : polyculture : 1,17 p. 100 — prairie : 2,21 p. 100 — forêt : 1,77 p. 100). Il faut remarquer la plus grande dispersion des valeurs sous prairie.

— matière organique libre : pas de différence nette entre polyculture et prairie. Pas de variations sensibles en fonction du temps *pour l'intervalle étudié.*

En première approximation la matière organique libre relativement stable n'intervient pas dans le bilan humique ; si :

y = carbone de l'humus à instant t (p. 1000 terre sèche)
t = temps (an)
K_2 = coefficient de décomposition de l'humus,

on a :

$$dy = K_2 y dt$$

ce qui donne

$$Ly = Ly_0 - K_2 t$$

ou

$$y = y_0 \, e^{-K_2 t}$$

La régression calculée entre Ly et t dans le cas des précédentes polycultures, pour une majorité de sol sableux est significative au seuil 5 p. 100 : elle donne

$$y_0 = 7{,}88$$

et

$$K_2 = 0{,}047.$$

On remarquera la valeur exceptionnellement élevée du coefficient K_2 pour un sol qui n'est pas travaillé. Si la texture très légère de ces sols constitue une explication plausible, on peut aussi mettre en doute la représentativité d'un échantillon aussi réduit.

b) *Horizon superficiel concerné par les travaux d'entretien.*

Il est constitué par un mélange des horizons initiaux organique et non organique, en proportion variable selon l'inclinaison des bandes du labour de défoncement et la profondeur maximale du travail superficiel consécutif.

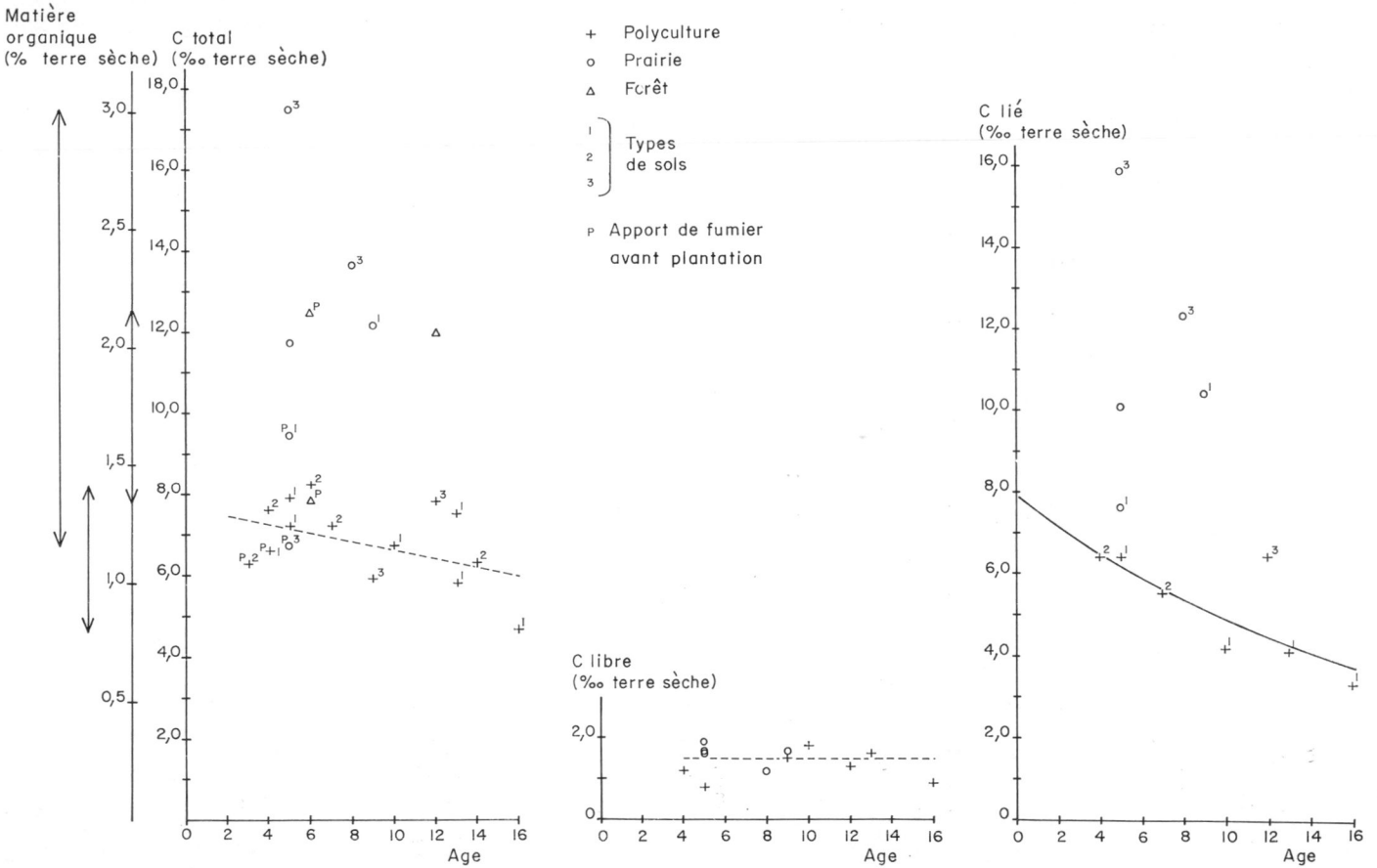


FIG. 7. — *Evolution de la matière organique totale libre et liée de l'ancien horizon superficiel*

Les courbes moyennes, calculées par la méthode des moindres carrés, sont relatives au précédent polyculture seulement et figurées en pointillé lorsque la régression n'est pas significative au seuil 5 p. 100. Les ajustements sont linéaires sauf pour le cas du carbone lié ($y = y_0 e^{-k_2 t}$).

Remarquer l'importance de la gamme de variation de la matière organique dans le cas du précédent prairie (traits verticaux tracés à gauche de l'axe des ordonnées).

Cette profondeur délimite la base de ce que nous appellerons l'horizon superficiel.

Les principaux facteurs pouvant intervenir sur la teneur actuelle en matière organique sont :

le précédent cultural qui influence la teneur initiale ;
l'âge de l'arbre ;
le type de sol ;
la quantité de matière organique apportée avant plantation ;
la quantité de matière organique apportée en entretien.

On tient compte uniquement des apports de fumier (1). La profondeur travaillée et la quantité de cailloux étant variables, nous avons calculé les apports en kg de fumier (matière sèche) pour 1 000 kg de terre fine travaillée ; pour cela on a tenu compte de la profondeur travaillée et de 3 classes de teneur en cailloux. Les apports ainsi calculés se répartissent ainsi :

TABLEAU 2

Teneur en matière organique et apport annuel de fumier

Effectif	Apport annuel kg de fumier (matière sèche) pour 1 000 kg de terre fine	Teneur en matière organique totale (%)		
		Minimum	Moyenne	Maximum
7	0	0,68	1,11	1,67
6	0-2	0,61	1,03	1,40
6	2-4	1,00	1,54	2,13
2	4-6	0,80	1,31	2,28
1	8	0,78	1,55	2,06

La figure, teneur en matière organique, âge de plantation, a été construite en distinguant les facteurs précédemment définis (fig. 8). A cause du nombre de facteurs de variation possible et du nombre de classes existant pour chaque facteur, les effectifs sont trop faibles pour faire des comparaisons homologues. On remarque simplement qu'en l'absence d'apport organique, la teneur en matière organique a tendance à diminuer (fig. 8 *a*). Avec apport, par contre, il y a augmentation, la régression matière organique — log âge (2) étant significative au seuil 1 p. 100.

On n'a pu aboutir à des conclusions précises pour les raisons ci-dessus évoquées, mais également du fait des approximations de calcul (teneur en cailloux), de l'impré-

(1) Les engrais verts d'hiver sont pour leur plus grande partie décomposés au moment du prélèvement (fin juin, début juillet).

(2) L'ajustement logarithmique nous a paru mieux traduire l'allure du phénomène.

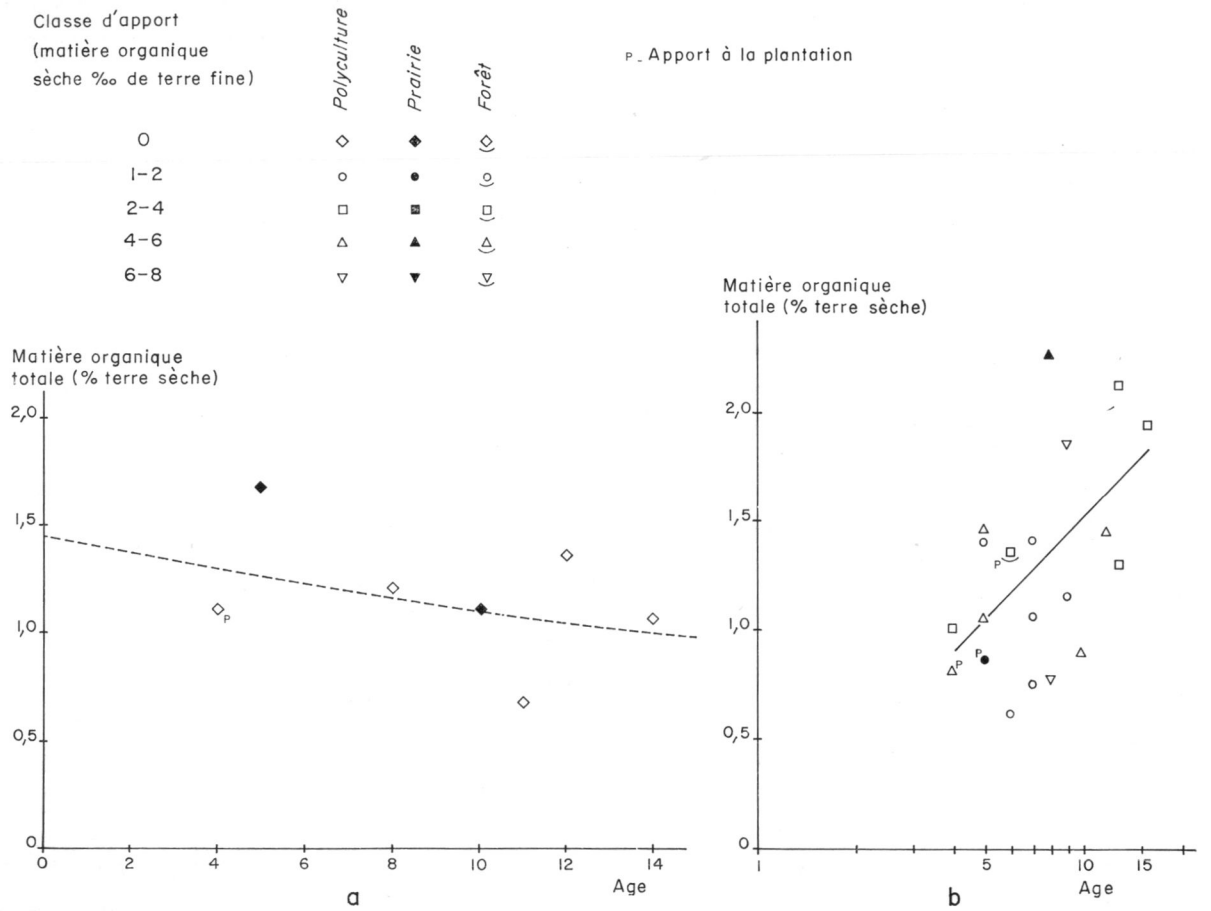


FIG. 8. — *Évolution de la matière organique totale de l'horizon superficiel travaillé en fonction des apports annuels de fumier. Courbes moyennes en pointillés lorsque les régressions ne sont pas significatives au seuil de 5 %*

a — apports de fumier nuls — Courbe de la forme $y = y_0 e^{-kzt}$, la variation de teneur est pratiquement négligeable, les apports étant nuls.
b — apports non nuls

cision des teneurs en matière organique (1) et des apports de fumier (quantités mal connues, apports irréguliers et de périodicité variable : tous les 2, 3 ans etc.).

2° *Action de la matière organique sur l'enracinement.*

Nous rappelerons simplement quelques faits d'observation :

— installation préférentielle des racines dans les anciens horizons organiques superficiels (cf. chap. racines).

— prolifération des racines dans les morceaux de fumier enfouis à la limite inférieure de l'horizon superficiel.

Ainsi la matière organique, mélangée au sol ou localisée, favorise la ramification des racines. Si la localisation préférentielle des racines qui en résulte ne présente pas forcément un intérêt du point de vue de la forme et de la répartition de l'enracinement, elle montre que la matière organique a un effet bénéfique en favorisant la ramification des racines et donc la bonne exploitation de la zone de sol enrichie.

Notons toutefois que les « mats » de prairie et surtout de forêt sont des exceptions, certainement parce qu'ils constituent des milieux s'humectant difficilement une fois desséchés (2). Ces couches organiques constituent alors un obstacle à la circulation de l'eau et à l'installation des racines.

Lorsque de la matière organique (même du fumier) est enfouie dans un sol très humide, elle accroît temporairement la mauvaise aération du sol (observation de fumier localisé et tassé entouré d'une zone de gley dans un sol sur mouillère).

3° *Action de la matière organique sur la vigueur et le rendement du pêcher.*

La mise en évidence d'un effet global de la matière organique peut se faire en examinant l'action sur le rendement et la circonférence du tronc :

— du niveau organique du profil au moment de la mesure du rendement et de la circonférence du tronc,

— de la quantité de matière organique apportée.

a) *Niveau organique.*

En arboriculture, ce niveau est difficile à caractériser par un paramètre unique. Les diverses couches de profil (couche de surface, anciens horizons superficiels et sous-jacents) ont des teneurs en matière organique différentes. Même si ces teneurs étaient connues, il resterait à les combiner en un indice global. Aussi avons-nous pris en considération seulement *la teneur en matière organique de la couche superficielle* pour laquelle on disposait d'un effectif suffisant. En examinant les courbes moyennes rendement-âge et circonférence du tronc-âge on n'a pas constaté un groupement systématique des points de part et d'autre ce ces courbes, selon qu'ils correspondent à des teneurs en matière organique faibles ou élevées.

(1) La couche de surface provient d'un mélange plus ou moins parfait d'horizons organiques et non organiques. Le fumier apporté est réparti de façon d'autant plus homogène qu'il y a eu plus de façons superficielles au moment du prélèvement. On peut commettre de grosses erreurs pour un apport récent encore mal mélangé.

(2) L'humectation au laboratoire est rigoureusement impossible.

b) *Apports de matière organique.*

Il peuvent être faits :

— avant la plantation, le fumier étant alors enfoui sur l'épaisseur du sol défoncé.

— en entretien : apports plus ou moins réguliers concernant la couche de surface travaillée.

Ces modes d'apport peuvent intervenir seuls ou en combinaison comme l'indique le tableau 3, relatif à 33 arbres non irrigués, où on a distingué les apports nuls (—) et non nuls (+).

TABLEAU 3

Apport de fumier en entretien et à la plantation
(Nombre d'arbres)

		Apport en entretien	
		+	—
Apport avant plantation	+	6	3
	—	18	6

Pour le groupe le plus représenté (entretien +, plantation —) on a construit les courbes moyenne rendement – âge et circonférence du tronc-âge (ajustée sous la forme $y = ax^n$) (fig. 9) ; on a ensuite considéré la position par rapport à ces courbes des points représentatifs correspondant aux apports nuls en entretien (9) et aux apports à la plantation (fig. 9).

Étant donné le faible effectif nous avons cru pouvoir considérer 2 fois les 3 individus communs aux classes plantation + entretien —.

On prend pour chaque point sa distance algébrique à la courbe moyenne (comptée > 0 au-dessus de la courbe et < 0 en dessous) et on teste l'hypothèse que la moyenne de ces distances est nulle. Dans le cas de la circonférence du tronc la moyenne est quasi nulle (pas d'apport en entretien : 0,3 cm — apport avant plantation : + 0,4 cm). Pour les rendements, pas d'apport en entretien : + 4,2 kg par arbre, non significativement différent de zéro (seuil 50 %) ; apport avant plantation : + 4,0 kg arbre, non significativement différent de zéro (seuil 40 %). Vu la faiblesse des effectifs [1] il n'est pas possible de parvenir à une conclusion valable. Tout au plus peut-on dire que l'absence d'apport de matière organique en entretien ne se traduit pas par un abaissement de rendement appréciable. Remarquons aussi que malgré les apports nuls en entretien les teneurs en matière organique de l'horizon superficiel restent assez élevées.

[1] Inhérent à la population elle-même. Très peu d'arboriculteurs ne font pas d'apport en entretien.

Les apports annuels de fumier n'ont pas été introduits comme variables dans la régression multiple parce que les quantités apportées n'étaient pas toujours connues. Pour 27 arbres non irrigués, le coefficient de corrélation simple entre le rendement (t/ha) et les apports de fumier (kg de fumier exprimé en matière sèche pour 1 000 kg de terre fine) est seulement de 0,129 alors que la valeur limite au seuil 10 p. 100 est 0,312.

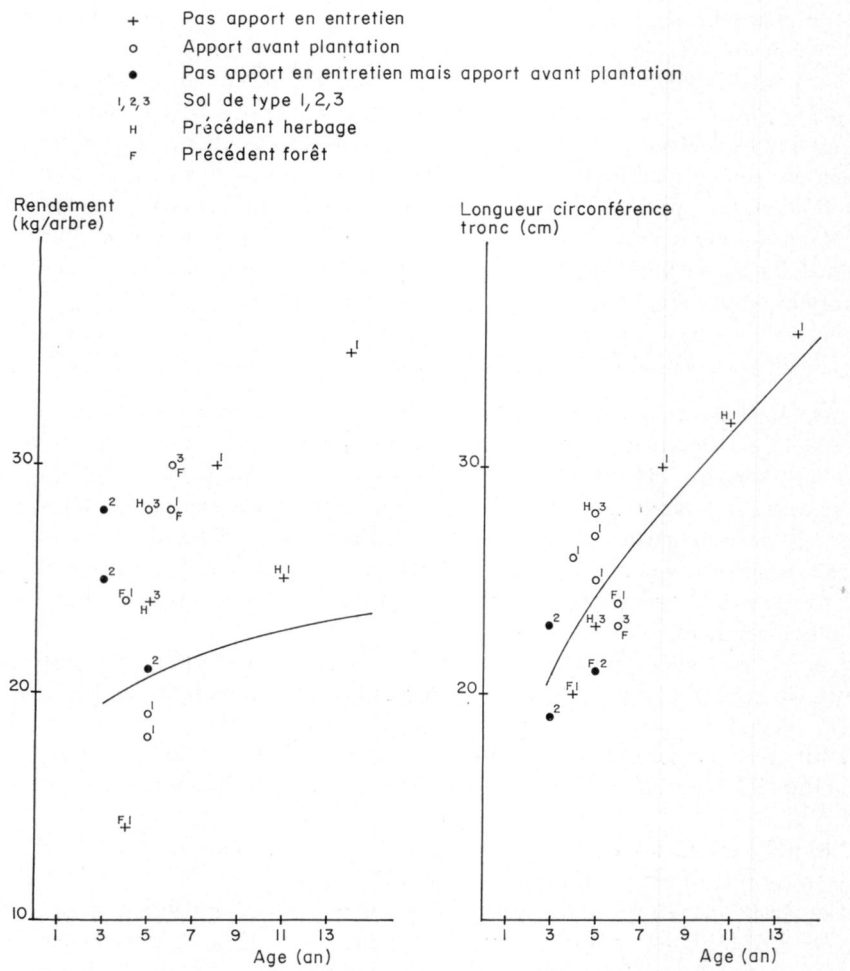


FIG. 9. — *Influence des apports de matière organique sur le rendement 1966 et la circonférence du tronc 1966. Arbres non irrigués*

Les courbes correspondent aux arbres poussant sur des sols qui n'ont pas eu de fumier avant plantation mais en reçoivent en entretien.

Pour 24 arbres irrigués ce même coefficient de corrélation est de — 0,069 (valeur limite au seuil 10 p. 100 : 0,323). Il est très peu vraisemblable que dans ces conditions la variable apport annuel de fumier ait pu expliquer une partie de la variation du rendement, si elle avait été introduite dans la régression multiple.

Conclusion.

L'absence d'apport de matière organique *en entretien* ne paraît pas avoir d'effet dépressif, ce qui peut s'expliquer par les conditions particulières de la région : structure monoparticulaire en surface, précédents culturaux autres que vergers, niveau organique relativement élevé de l'horizon supérieur même en l'absence d'apport.

La teneur en matière organique de cet horizon superficiel ne semble pas avoir d'effet tant sur la vigueur que sur le rendement, ou du moins cette action est d'un ordre de grandeur suffisamment faible par rapport à celles des autres facteurs pour ne pas avoir été décelée par notre analyse.

Par contre, dans la zone plus profonde du profil où se trouve la quasi totalité des racines, la matière organique est un élément favorable à la croissance et à la ramification des racines, si l'on en juge par la densité plus élevée de celles-ci dans les anciens horizons organiques superficiels enfouis par défoncement. Il se trouve donc en profondeur des zones où l'état organique est satisfaisant. La mise en évidence d'un effet global de l'état organique en profondeur ne serait possible que si l'on pouvait comparer les arbres poussant sur les profils précédents à ceux des profils très pauvres en matière organique, ce qui n'existe pas dans la région.

F. — *Caractéristiques chimiques des sols et fertilisation minérale*

Les quarante analyses de sol réalisées concernent les vergers non irrigués et se répartissent sur les trois types de substratum : granitique, schisteux et colluvial. Les échantillons ont été pris en majorité dans l'horizon superficiel travaillé, quelques prélèvements ont cependant été faits dans les horizons enfouis par le défoncement: l'ancien horizon de surface d'une part, l'ancien horizon profond d'autre part.

La majorité des sols a une teneur faible à très faible en acide phosphorique [1]. 50 p. 100 des sols sur granite et sur schiste et 60 p. 100 des sols sur colluvions sont gravement carencés.

Les sols sont mieux pourvus en potasse, 60 p. 100 des sols sur granite, 50 p. 100 de ceux sur schiste et 75 p. 100 de ceux sur colluvions présentent des besoins négligeables.

Pour le phosphore et surtout pour la potasse, l'horizon superficiel est mieux pourvu que les deux horizons enfouis, ces deux derniers ne diffèrent pas sensiblement entre eux.

Les pH sont acides à neutres (4,8 à 7,2) avec une moyenne de 5,7 ; ils ne varient pas de façon significative d'une roche mère à une autre.

Les doses moyennes annuelles en P et K apportées ont été retenues comme variables « techniques » dans le calcul de régression multiple. Ces variables n'apparaissent pas dans l'équation finale. Ceci peut s'expliquer par le fait que les variations d'apport observées (de 0 à 320 unités/ha pour le phosphore et de 0 à 240 unités/ha pour la potasse) peuvent être compensées par les apports de fumier, ou parce que d'autres variables prennent en compte les liaisons entre les apports en éléments minéraux et le rendement, comme le laissent supposer les remarques qui suivent.

Il faut en effet noter la corrélation significative au seuil de 5 p. 100 entre l'apport d'azote et la surface de frondaison ($r = 0{,}30$) pour les pêchers irrigués. Pour l'en-

[1] Les analyses P et K ont été faites à l'aide de la trousse Barbier-Morgan.

semble des arbres, il existe une corrélation entre les apports de P et de K ($r = 0,72$; $P = 0,01$) qui indique que quels que soient les niveaux respectifs des sols en P et K les apports annuels des deux éléments sont liés. Ces apports ne sont pas significativement différents dans les vergers non irrigués et irrigués.

Pour ces derniers, on observe une corrélation entre l'apport d'azote et la densité de plantation d'une part ($r = 0,61$; $P = 0,01$) et la dose d'irrigation d'autre part ($r = 0,46$; $P = 0,05$). Il semblerait que les exploitants adaptent dans une certaine mesure la fertilisation azotée aux techniques d'irrigation mais pas l'ensemble de la fertilisation minérale.

G. — *L'excès d'eau*

De nombreux vergers présentent des zones dans lesquelles les arbres sont manquants ou ont une croissance réduite. L'analyse comparée d'une surface de 600 ha à l'aide de deux couvertures de photographies aériennes, l'une de 1948, l'autre de 1958 permet de constater que ce phénomène se manifeste sur plus de 10 p. 100 des parcelles plantées entre ces deux dates. L'étude sur le terrain de plusieurs de ces parcelles permet de constater que les vergers à mortalité élevée ou à vigueur réduite correspondent, le plus souvent, à des zones humides ; cette observation est confirmée par les dires des exploitants.

Nous avons cherché sur quelques-unes de ces parcelles :

— à préciser le rôle de l'excès d'eau sur la croissance de l'arbre ;

— à mettre en relation les accidents de croissance constatés avec les variations climatiques ;

— à mettre en évidence les causes pédologiques de l'excès d'eau.

1° *Analyse comparée de la croissance des arbres en zone saine et en zone humide.*

L'exemple d'une zone humide d'un verger de 4 ans montre que de nombreux arbres morts ont été remplacés ; les troncs des arbres non remplacés ont un diamètre plus faible que ceux des arbres situés en zone saine : 18,4 cm contre 24,4 cm, différence significative à $P = 0,01$.

Pour identifier les facteurs qui limitent la vigueur des arbres nous avons comparé la croissance d'un arbre sain choisi au hasard dans la parcelle en dehors de la zone humide, et d'un arbre mort en 1966 repéré de la même façon, dans cette dernière zone et ceci dans huit vergers différents. Nous avons mesuré à 30 cm du sol, le rayon du tronc ainsi que l'épaisseur des cernes de croissance annuelle sur des carottes prélevées sur ces arbres à l'aide d'une tarière forestière.

Les résultats de ces mesures montrent que tous les arbres plantés en zone humide et morts en 1966 ont un rayon plus faible que ceux plantés en zone saine. Tous les arbres de 4 ou 5 ans, morts en 1966 ont été handicapés dans leur croissance au cours de l'année 1963. Par contre, les arbres plus âgés (8 et 9 ans) ne présentent pas de différence de croissance en 1963 entre arbres morts et arbres sains ; les écarts de croissance ont pour origine principale les années 1957, 1959 ou 1960, pour lesquelles les vergers avaient moins de 5 ans.

L'examen des conditions de sol ne permet pas de séparer les deux lots « arbres âgés » et « arbres jeunes » ; elles ne peuvent par conséquent expliquer la différence de comportement observée : c'est l'âge de l'arbre qui semble déterminer sa réaction physiologique aux conditions défavorables.

2° *Caractéristiques climatiques des années 1957 à 1966.*

L'observation des moyennes mensuelles des précipitations révèle que les années où se sont manifestés des accidents de croissance c'est-à-dire 1957, 59, 60, 63 et 66 présentent toutes 1 ou 2 mois exceptionnellement humides entre février et septembre. La table de contingence ci-dessous indique qu'il existe une liaison évidente entre la croissance anormale des arbres et les années humides.

	Nombre d'années où les précipitations moyennes mensuelles sont égales ou supérieures à deux fois la moyenne sur 10 ans	Nombre d'années où les précipitations moyennes mensuelles de tous les mois sont inférieures à deux fois la moyenne sur 10 ans
Nombre d'années de croissance anormale des arbres	5	0
Nombre d'années de croissance normale des arbres	1	4

On constate dans la série des moyennes mensuelles que pour ces mêmes années, 1966 présente un mois de février très humide et exceptionnellement chaud (moyenne de février : 7°,8 ; normale : 4°,3). On peut penser que c'est la conjonction de ces deux caractères du climat qui a entraîné la mort en 1966 des arbres jeunes et vieux.

3° *Caractéristiques des sols en zone saine et humide.*

L'engorgement du sol peut avoir des origines différentes.

a) *Mauvaises propriétés structurales.*

Les mesures de l'indice K de percolation montrent que 57 p. 100 des 14 zones humides étudiées présentent des conditions défavorables de stabilité (log 10 K inférieure à 1,5). Dans ce cas l'eau de pluie provoque un engorgement rapide des sols et un ressuyage lent qui entraîne une asphyxie du collet ou des racines.

b) *Hétérogénéité dans le profil du sol.*

La présence d'un horizon de texture fine peu perméable limite l'infiltration des eaux de pluie, créant ainsi des conditions asphyxiantes dans l'horizon sus-jacent.

c) *Résurgence d'eau d'origine souterraine.*

Des engorgements provoqués par la remontée d'eau d'origine souterraine formant des « mouillères » ont été observées. L'eau provient des fissures de la roche mère granitique sousjacente.

En définitive dans les zones humides la croissance des arbres est fortement ralentie et la mortalité élevée. La mort des arbres revêt un caractère accidentel lié à la conjonction d'une mauvaise situation au niveau du sol et de circonstances météorologiques exceptionnelles, telles qu'un mois humide et doux. Dans la série des dix dernières années, le mois de février 1966 en est un exemple. On peut penser que les périodes du printemps et à un moindre degré de l'automne seront de ce fait les plus à redouter ; pendant la saison de végétation en dehors des époques précédentes, la croissance est seulement réduite, si les pluies sont excessives. Les arbres de 4 et 5 ans apparaissent plus sensibles aux excès d'eau que les arbres plus âgés. Enfin l'excès d'eau, qui caractérise les zones humides résulte de mauvaises propriétés structurales, d'une hétérogénéité dans le profil et le plus souvent de « mouillères ».

H. — *L'alimentation en eau des arbres*

Elle dépend des caractéristiques climatiques (évapotranspiration, pluviométrie) ou techniques (irrigation) et du sol qui intervient en mettant en réserve une partie des excédents momentanés de la pluviométrie sur l'évapotranspiration et en cédant par la suite cette eau à l'arbre. Il y a, au niveau du sol, des aspects dynamiques tant lors de sa réhumectation que de la cession de l'eau aux racines. Nous n'aborderons pas ces questions, nous bornant à établir un bilan de l'eau à partir de la capacité de réserve du sol et des caractéristiques climatiques.

a) *Caractéristiques climatiques.*

Nous avons caractérisé le climat par le déficit climatique (déficit de l'évapotranspiration potentielle sur la pluviométrie) et l'excédent climatique (excédent de la pluviométrie sur l'évapotranspiration).

On a utilisé les relevés de pluviométrie disponibles dans la zone (1) et calculé l'évapotranspiration potentielle par la formule de L. Turc (1961).

Le tableau 4 rassemble les valeurs mensuelles moyennes concernant la pluviométrie, l'évapotranspiration, le déficit et l'excédent.

Ces évaluations sont valables pour un sol horizontal, c'est-à-dire où le ruissellement peut être considéré comme négligeable. Pour les sols en pente le déficit indiqué est une évaluation par défaut. Ces cas sont fréquents dans la région, les pentes de 10 p. 100 et plus étant nombreuses (2).

b) *Capacité de réserve en eau du sol* (quantité d'eau utile retenue par l'épaisseur de sol exploitée par les racines et par la couche superficielle travaillée).

α) *Mode de calcul.*

Le sol étant caillouteux, la formule classique faisant intervenir l'épaisseur de sol utilisé (p), l'intervalle entre la capacité au champ et le point de flétrissement de la terre fine (eau utile) et la densité apparente est ainsi modifiée. Dans tous les cas on

(1) Relevés de Saint-Félicien entre 1955 et 1965.

(2) Le calcul pour chaque mois de l'indice de concentration pluviale de Fournier (1960) permet d'évaluer le ruissellement en verger sol nu de 5 à 10 p. 100 de l'eau tombée lorsque la pente est de 10 à 15 p. 100.

utilise la densité apparente partielle de terre fine (d_t). Si les cailloux retiennent eux-mêmes de l'eau on ajoute à la capacité de réserve, le terme $d_c p e$ où d_c = densité apparente partielle de cailloux et e = quantité d'eau cédée par les cailloux à la terre lorsque celle-ci passe de la capacité au champ au point de flétrissement (ressuyage à l'appareil à plaque ou à membrane de cailloux enrobés dans la terre fine).

TABLEAU 4

Caractéristiques climatiques

Mois	P (mm) (2)	ETP (mm) (3)	Déficit climatique ETP — P (4)	Excédent climatique P — ETP
Mars	75	40	0	40
Avril	75	65	15	0
Mai	55	95	38	0
Juin	95	115	30	0
Juillet	55	135	80	0
Août	80	110	43	0
Septembre	95	85	34	0
Octobre	90	35	0	65
			240	

La moyenne des déficits mensuels (4) n'est pas la différence entre pluviométrie et évapotranspiration moyenne (3) — (2).

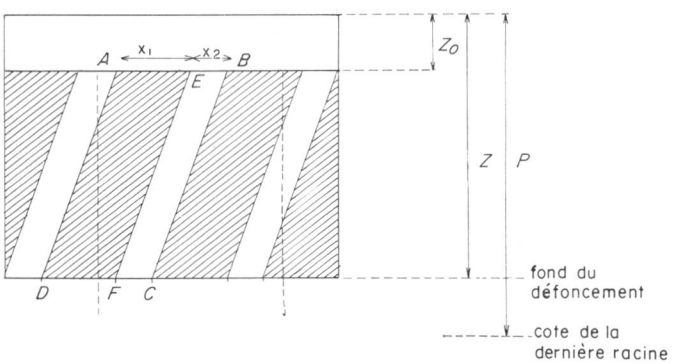


FIG. 10. — *Calcul de la capacité de réserve en eau après défoncement*

Du fait du défoncement d'autres modifications doivent être apportées au calcul classique. En effet une coupe de sol perpendiculaire à la direction du labour se présente ainsi (fig. 10) : on a un système périodique de bandes inclinées comprises entre l'horizon de surface (résultant du travail superficiel du sol) et les horizons profonds en dessous de la limite de défoncement. La capacité de réserve totale est la somme de celle des horizons superficiels et profonds et des bandes inclinées. Pour un élément

tel que ABCD (constituant une période) on considère les volumes des prismes de hauteur « $z - z_0$ » et de section horizontale $x_1 \cdot 1$ et $x_2 \cdot 1$; si d_{t1} et d_{t2} sont les densités apparentes partielles de la terre fine des couches telles que AEFD et EBCF, C_1 et C_2 les capacités au champ et F_1, F_2 les points de flétrissement, on a :

$$z_{ABCD} = d_{t1} \cdot x_1(z - z_0)(C_1 - F_1) + d_{t2} \cdot x_2(z - z_0)(C_2 - F_2)$$

Comme il y a $1/(x_1 + x_2)$ prismes ABCD dans l'unité de longueur la capacité de réserve pour la terre fine de la couche inclinée est :

$$r_t = \frac{z - z_0}{x_1 + x_2} [d_{t1}x_1 (C_1 - F_1) + d_{t2}(C_2 - F_2)].$$

La contribution éventuelle des cailloux s'écrira de façon analogue :

$$r_c = \frac{(z - z_0}{x_1 + x_2} [d_{c1} \cdot x_1 \cdot e_1 + d_{c2} \cdot x_2 \cdot e_2].$$

Le calcul précédent peut être simplifié, au détriment de la précision, de la façon suivante : h étant la profondeur du labour au moment du défoncement, on l'assimile à la cote z du fond du labour par rapport au niveau actuel du sol (ce qui revient à négliger le foisonnement). Ce mode de calcul a donné des différences de moins de 10 p. 100 par rapport au calcul rigoureux.

Enfin, dans certains cas, on a réalisé un calcul rigoureux en considérant, sur les relevés de chaque profil, les proportions respectives correspondant à des terres de nature différente (essentiellement organique et non organique), les bandes de labour étant difficiles à reconstituer. Ce mode de calcul a été utilisé pour les sols irrigués.

β) *Valeurs des paramètres entrant dans le calcul.*

L'épaisseur « p » de sol utilisé est la cote par rapport à la surface du sol de la racine la plus profonde. La plupart du temps elle correspond à celle du fond du défoncement z. La couche de sol de surface quoique non exploitée par les racines cède de l'eau qui contribue à l'évapotranspiration par évaporation directe. Lorsque, au-dessous du défoncement, il y a de la roche altérée, on admet en première approximation que celle-ci se dessèche sur 1 dm au profit de la terre fine sus-jacente. Dans le cas des sols irrigués on a pris pour « p » la cote au-dessous de laquelle il n'y avait plus de racines visibles.

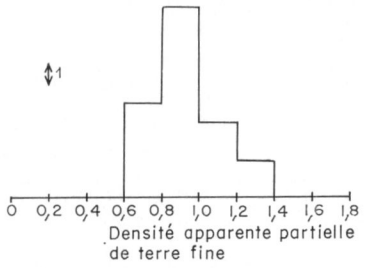


FIG. 11. — *Diagramme de fréquence de la densité apparente partielle de terre fine*

— terre fine : les valeurs des densités apparentes partielles de terre fine et l'eau utile sont traduites par les diagrammes 11 et 12. La gamme de variation de l'eau utile est relativement importante ; le classement des valeurs par roche-mère ou type de sol ne permet pas d'expliquer cette variation. Par contre, la prise en considération de la teneur en matière organique et des classes granulométriques 0-2 μ, 2-20 μ, 20-50 μ, 50-200 μ permet d'expliquer une partie des variations des caractéristiques hydriques : point de flétrissement, capacité au champ, eau utile. Les régressions calculées après choix des variables et analyse progressive comme indiqué au chapitre « méthode », sont données dans le tableau 5 où l'on indique les coefficients de régression partielle significatifs au seuil 5 p. 100.

Parmi les variables retenues certaines « prennent en compte » les effets de celles qui sont en corrélation avec elles : par exemple, comme la fraction 20-50 μ est en corrélation simple avec les fractions 0-2 μ ($r = 0{,}703$), 2-20 μ($r = 799$) et 50-200 μ($r = 0.278$), le coefficient de régression de l'eau utile en (20-50) μ peut traduire aussi l'effet de l'argile et du limon.

La matière organique intervient dans l'eau utile, une augmentation de 1 p. 100 de la matière organique totale fournissant un gain d'eau utile de 2 p. 100 environ. Sur une épaisseur de 50 cm cela représente 14 mm (densité apparente du sol de 1,4) ou 8 mm (densité apparente partielle de terre fine de 0,8). Ce sont là des quantités relativement faibles, eu égard aux apports organiques nécessaires à l'obtention et au maintien d'un supplément organique de 1 p. 100 sur une telle épaisseur.

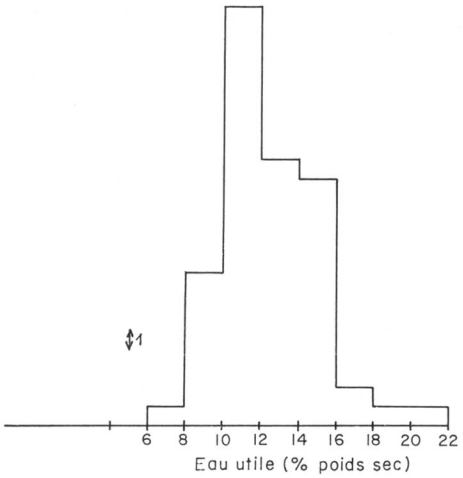


FIG. 12. — *Diagramme de fréquence de l'eau utile*

TABLEAU 5

Coefficients de régression partielle

Caractéristiques hydriques	Coefficients de régression					
	Matière organique	0-2 μ	2-20 μ	20-50 μ	50-200 μ	Terme constant
Point de flétrissement		0,277			0,070	1,126
Capacité au champ évaluée	2,132	0,467			0,141	8,006
Eau utile évaluée	2,057		0,339			7,410

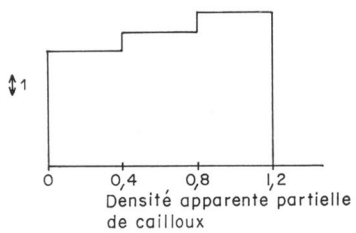


FIG. 13. — *Diagramme de fréquence de la densité apparente partielle des cailloux*

— Cailloux. La densité apparente partielle des cailloux est représentée par le diagramme de fréquence 13. Les cailloux se trouvant dans le profil ont une porosité totale (p. 100 de volume apparent) qui varie entre 11 et 15 pour les granites et les gneiss et 17 et 24 pour les schistes : les eaux utiles moyennes correspondantes exprimées en p. 100 de poids sec sont respectivement de 2,7 et 4,2.

Pour la roche située en dessous de la profondeur de défoncement la densité apparente est de 2,30 pour les granites et 2,14 pour les schistes.

γ) *Valeurs des capacités de réserve.*

Le tableau 6 donne des exemples de capacité de réserve. Pour les sols caillouteux les capacités de réserve sont comprises entre 50 et 100 mm environ. La valeur de 186 mm est relative à un sol limoneux, type peu représenté dans la région.

Remarquons qu'à épaisseur de sol identique celui qui ne contient pas de cailloux est plus avantageux quant à la réserve en eau ; en effet en substituant à 1 dm^3 de terre fine en place 1 dm^3 de cailloux altérés, on perd du fait de l'enlèvement de la terre $1{,}40 \cdot 11 = 15$ mm, alors qu'on gagne seulement $2{,}30 \cdot 2{,}7 = 6{,}2$ mm dans le cas du granite et $2{,}14 \cdot 4{,}2 = 8{,}9$ mm pour le schiste. Ceci traduit le fait que : pour un même volume apparent la quantité d'eau retenue par la roche altérée est intermédiaire entre celles de la roche saine (nulle) et du sol qui en résulte.

TABLEAU 6

Valeurs de la capacité de réserve

Nature des sols	Épaisseur considérée $p + 10$ (cm)	Contribution de la terre fine (mm)	contribution des cailloux (mm)	Capacité de réserve (mm)
Sols sur granite	60	39,4	12,2	51,6
	70	53,7	20,5	74,2
	70	48,6	18,6	67,3
Sols sur schiste	80	69,2	29,4	98,6
	70	72,0	32,8	104,8
Sols peu caillouteux	70	82,1	2,5	84,6
	70	183,1	2,8	185,9

c) *Bilan de l'eau en conditions naturelles.*

Nous considérons les capacités de réserve en eau de 50-100 et 150 mm qui correspondent schématiquement aux sols très caillouteux, peu et non caillouteux. Les résultats sont indiqués dans le tableau 7.

Même dans les cas les plus favorables, en conditions naturelles, l'alimentation en eau des arbres n'est pas satisfaisante. L'eau est donc un facteur limitant de la production. Pour combler le déficit il faudrait apporter de 90 à 200 mm en supplément.

d) *L'irrigation*

Il n'est pas possible de comparer les rendements moyens des arbres non irrigués et irrigués puisque les caractéristiques de l'irrigation sont très variables ; en outre les arbres irrigués sont plus âgés et reçoivent des fumures azotées plus importantes.

Dans la régression multiple l'apport annuel moyen d'eau n'intervient pas, que ce soit sous forme linéaire, quadratique ou logarithmique.

Par contre le logarithme du déficit intervient au seuil 1 p. 100 avec un coefficient de régression partielle de + 41,15, ce qui traduit une variation parallèle du rendement et du déficit assez paradoxale.

TABLEAU 7

Bilan de l'eau avec différentes capacités de réserve

Mois	Déficit climatique (moyenne des déficits mensuels)	Capacités de réserve en eau du sol					
		50 mm		100 mm		150 mm	
		Valeur de la réserve	Quantité d'eau à apporter (1)	Valeur de la réserve	Quantité d'eau à apporter (1)	Valeur de la réserve	Quantité d'eau à apporter (1)
Mars	0	50	0	100	0	150	0
Avril	15	35	0	85	0	135	0
Mai	38	0	3	47	0	97	0
Juin	30	0	30	17	0	67	0
Juillet	80	0	80	0	63	0	13
Août	43	0	43	0	43	0	43
Septembre	34	0	34	0	34	0	34
Octobre	0	50	0	65	0	65	0
	240		190		140		90

(1) pour que la réserve ne soit jamais nulle

L'indice i_2 : rapport du nombre d'années pour lesquelles l'irrigation a été pratiquée, sur âge de l'arbre n'intervient pas significativement.

Dans une région où le déficit en eau est notable, l'absence d'effet de la quantité d'eau apportée peut s'expliquer ainsi :

— cette quantité d'eau est une valeur moyenne qui peut être différente de la quantité d'eau réellement apportée en 1966 (année de mesure des rendements) s'il a été tenu compte de la pluviométrie pour la conduite de l'irrigation ;

— dans le cas où il n'en aurait pas été ainsi, le déficit de l'année 1966 se serait relativement mal prêté à la constatation de l'effet des doses moyennes ; ce déficit est en effet de 40 mm seulement pour une capacité de réserve moyenne du sol de 100 mm ;

— il n'y a pas eu d'effet cumulatif de l'irrigation sur le format de l'arbre (coefficients de corrélation simples de 0,035 pour la circonférence du tronc et de 0,127 pour la section de couronne) à cause vraisemblablement de la valeur du déficit moyen (140 mm pour une capacité moyenne de réserve du sol de 100 mm) par rapport aux apports d'eau. 44 p. 100 de ces apports dépassent ce déficit, d'où l'existence plausible d'un effet moins que proportionnel qu'on a essayé de traduire par la transformation logarithmique. 20 p. 100 de ces apports sont égaux ou supérieurs à 2 fois le déficit moyen, d'où un effet dépressif possible dans des sols aussi légers où l'entraînement

de l'azote, mais aussi des éléments dits fixes peut être notable. Dans ces conditions un effet indirect de l'irrigation par l'intermédiaire du format de l'arbre ne pouvait être décelé.

L'interprétation de la liaison positive rendement-déficit doit se faire à partir du calcul de la capacité de réserve en eau $\underline{r}$ puisque l'expression du déficit, ETP — P — $\underline{r}$ [1] (où ETP est l'évapotranspiration potentielle, P la pluviométrie) fait intervenir des valeurs moyennes et donc constantes sauf pour $\underline{r}$. $\underline{r}$ est proportionnel à l'épaisseur exploitée, à la densité apparente partielle de terre fine et à l'eau utile.

On a vu qu'il y avait une influence positive de l'épaisseur exploitée sur le rendement.

La liaison positive rendement-déficit pourrait traduire un effet indirect de ce genre : liaison négative rendement-finesse du sol (mauvaise aération des sols les plus lourds) par l'intermédiaire de l'eau utile [2]. De telles interprétations restent conjecturales et n'excluent pas des effets indirects plus complexes. On notera enfin que pour les caractéristiques de l'arbre sur lesquelles des effets cumulatifs du manque d'eau sont plausibles (circonférence du tronc, section de couronne) les coefficients de corrélation simple avec le log du déficit sont négatifs (respectivement — 0,322 et — 0,372) ; il se pourrait alors que l'effet constaté sur le rendement soit spécifique de l'année 1966.

I. — *Le défoncement*

D'une façon générale on a constaté jusqu'à maintenant une action positive du défoncement sur les sols limoneux profonds à mauvaises propriétés structurales, l'action étant nulle dans les sols sableux profonds à structure convenable (R. GRAS, 1962).

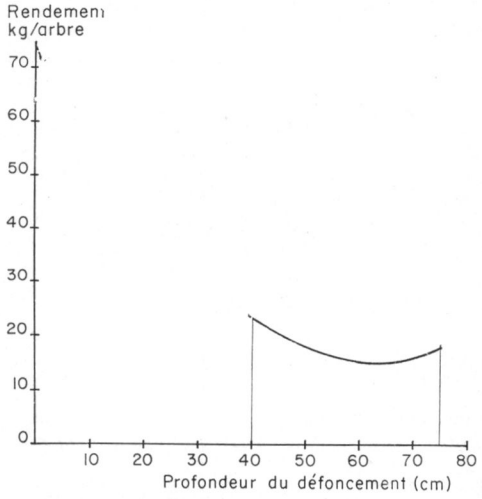


FIG. 14. — *Influence de la profondeur du défoncement sur les rendements pour les valeurs moyennes des autres variables en sols irrigués.*

(1) Pour éviter une confusion avec l'estimation du coefficient de corrélation *r*, la réserve en eau sera désignée par $\underline{r}$.

(2) L'eau utile est liée significativement à la teneur en éléments 2-20 μ.

Dans la région étudiée le problème est différent. Les sols, pour la plupart peu profonds, sont formés à partir de roches cristallines et le défoncement consiste alors à répartir la terre fine sur une plus grande épaisseur tout en la mélangeant à de la roche plus ou moins altérée arrachée à l'horizon de départ.

Pour les arbres non irrigués la profondeur de défoncement n'est pas en liaison avec le rendement. Pour les arbres irrigués le défoncement intervient de façon négative (fig. 14), l'ensemble formé par la composante linéaire et quadratique étant significatif au seuil 5 p. 100. La constatation de cet effet négatif nous a conduit à analyser séparément les effets possibles du défoncement, quoique ces effets ne soient pas toujours indépendants.

La réalisation d'un labour de défoncement concerne :

a) *L'ameublissement du sol.*

Les sols, quoique sableux, ne sont pas toujours bien structurés, les structures continues faiblement cohérentes étant très répandues. Le labour de ces sols est donc théoriquement bénéfique car ils en améliore la structure. En fait, la durée de cette amélioration est certainement assez courte, si l'on en juge par les structures continues constatées sur des sols préalablement défoncés. L'effet positif doit donc être relativement faible.

b) *L'épaisseur de sol exploitée.*

Le défoncement a un effet positif s'il augmente l'épaisseur exploitée.

L'importance de cet effet positif est cependant moins grande dans un sol à substratum rocheux que dans un sol profond : dans un tel sol le défoncement augmente le volume de terre fine exploitable par les racines alors que, dans le cas présent, il n'y a pas d'augmentation du volume de terre fine (du moins au départ, en première approximation), mais une répartition de celle-ci sur une plus grande épaisseur, une partie des cailloux étant mélangée à la couche labourée. Il y a donc simultanément augmentation de l'épaisseur de sol exploitable (effet positif) et dilution de celui-ci par des cailloux inutilisables par les racines (effet négatif).

La répartition de la terre fine sur une plus grande épaisseur permet aux racines de s'éloigner de la zone de surface soumise à la dessiccation et facilite ainsi une meilleure utilisation des précipitations.

c) *L'utilisation de l'horizon organique superficiel.*

Dans ces sols sableux, l'horizon superficiel plus organique est très favorable à la croissance des racines (cf. chapitre J). Examinons comment le défoncement modifie son utilisation.

Le labour transforme une couche organique continue et horizontale en un système périodique de bandes organiques inclinées, la période étant la largeur du labour *l*. Après le défoncement les façons superficielles font disparaître les crêtes des bandes de labour.

Le volume de terre organique accessible aux racines étant proportionnel à la section apparaissant lorsqu'on coupe le labour par un plan perpendiculaire nous examinerons ce qui se passe dans ce plan pour :

Le travail superficiel d'entretien du sol.

Considérons une largeur du sol *l* égale à la période du système.

— Sans défoncement. Du fait du travail superficiel une certaine section de couche organique est inutilisée,

— Avec défoncement. La quantité de sol inutilisée est beaucoup plus faible puisque les bandes sont inclinées. Le défoncement aboutit donc à une meilleure utilisation de la couche organique superficielle.

La répartition des racines dans le profil.

Les racines s'installant préférentiellement dans cet horizon organique seront réparties sur une plus grande épaisseur de sol après défoncement.

La distance entre les bandes organiques.

Le défoncement ne modifie pas la teneur moyenne en matière organique à l'ha. Mais lorsque à inclinaison des bandes constantes, on augmente la profondeur de défoncement (et donc corrélativement la largeur) les bandes organiques sont de plus en plus écartées. Dans la mesure où *toute l'épaisseur défoncée n'est pas exploitée* on aboutit à une diminution de la quantité de sol organique utilisée, rapportée à l'unité de surface de sol.

En définitive, *le défoncement a un effet bénéfique sur l'utilisation de la couche organique.* Cet effet croît avec la profondeur de défoncement à inclinaison des bandes de labour constant, (du moins tant que la profondeur de défoncement n'est pas excessive).

d) *Contribution des cailloux de l'horizon de départ à la capacité de réserve en eau.*

La roche, constituant l'horizon de départ retient une certaine quantité d'eau qui contribue à la capacité de réserve du sol. On admet en première approximation qu'une épaisseur de roche de 1 dm peut se dessécher au profit du sol exploitable sus-jacent (fig. 15). Si

d_c = densité apparente des cailloux,
E = eau utile des cailloux

sans défoncement la contribution de la roche sera $d_c \times E \times 1$.

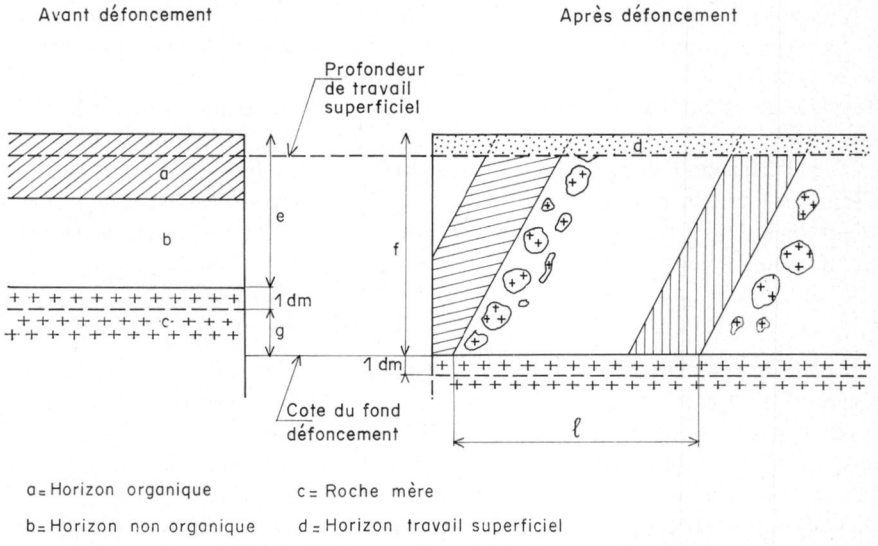


FIG. 15. — *Quelques effets possibles du défoncement d'un sol à horizon organique formé sur une roche éruptive.*
— augmentation de l'épaisseur du sol qui passe de " e " à " f ";
— répartition de l'horizon organique sur une plus grande profondeur ;
— diminution de la quantité de sol organique perturbée par le travail superficiel ;
— augmentation de la contribution de la roche altérée à la capacité de réserve en eau. La couche supplémentaire de roche d'épaisseur « *g* » mélangée à de la terre fine se dessèche au profit de celle-ci ;
— augmentation du taux de cailloux dans la nouvelle épaisseur f.

Le défoncement disloque l'épaisseur *c* (dm) de roche altérée en fragments de dimension inférieure au dm, qui, mélangés à la terre fine, contribuent à la capacité de réserve de la couche exploitée. La contribution supplémentaire des cailloux est alors cd_c E, la couche en dessous de la profondeur défoncée fournissant encore d_c E, en admettant que le degré d'altération de la roche et donc la porosité n'a pas diminué à cette profondeur.

La valeur de cette contribution supplémentaire varie avec le type de roche-mère : voici en mm d'eau par dm d'épaisseur de roches la quantité fournie :

granite : 2,3 -2,7 = 6,2 mm,
schiste : 2,14-4,2 = 8,9 mm.

Le défoncement a donc une action positive sur la capacité de réserve en eau, surtout dans le cas des sols schisteux. Cette action croît avec le degré d'altération.

Remarquons que la présence de cailloux non poreux en surface peut provoquer une certaine économie d'eau (effet mulch).

e) *Dilution de la terre fine par les cailloux.*

L'augmentation de la quantité de cailloux dans la terre fine, présente des inconvénients en gênant l'installation des racines et en augmentant, dans une certaine mesure, la longueur du trajet de l'eau extraite par la racine. On conçoit que lorsque la quantité de cailloux devient prépondérante, le mélange terre fine-cailloux ne présente plus les caractéristiques d'un sol. Ceci amène à concevoir que l'augmentation de la profondeur du défoncement puisse avoir un effet dépressif.

f) *Formation de terre fine par dislocation de l'horizon de départ.*

Du fait de la désagrégation de l'horizon de départ par le travail il y a formation d'une arène très grossière (45 p. 100 d'éléments de diamètre supérieur à 2 mm, D. COLLIER, 1961). Si le phénomène précédent aboutit à une accélération de la pédogenèse, le gain en sol ne paraît pas très important à court terme à cause de la quantité de l'arène ainsi formée, et de sa qualité (elle est essentiellement non colloïdale). Il est cependant possible que sur un laps de temps assez grand il y ait un gain réel.

L'action globale de la profondeur de défoncement x_3 sur le rendement R peut se traduire par une somme de fonctions dont certaines peuvent être non linéaires. Dans cette hypothèse, la fonction globale peut présenter un maximum. Compte tenu de l'intervalle de variation de la profondeur de défoncement pour les sols irrigués (40 à 75 cm), il n'est pas possible de vérifier l'hypothèse précédente : tout au plus peut-on assimiler la section de courbe obtenue à la partie décroissante de la courbe complète.

Ajoutons que la profondeur initiale du sol certainement variable, mais inconnue doit modifier dans chaque cas le mode d'intervention de la profondeur de défoncement et compliquer d'autant l'analyse du phénomène.

J. — *La densité de plantation*

L'effet de la densité de plantation n'a pas été étudié pour les arbres non irrigués, ce paramètre ne variant pas. Dans le cas de l'irrigation, malgré une variation importante de 500 à 1 190 arbres/ha, on n'a pas décelé d'influence de ce facteur. Il est possible que la disposition différente des arbres (carré, rectangle, quinconce) modifie l'effet de la densité. Il paraît plus vraisemblable d'incriminer la constitution de l'échantillon (50 p. 100 des arbres sont plantés à la même densité) et l'irrigation qui diminue les effets de concurrence pour l'eau.

K. — *L'enracinement*

L'étude de l'enracinement en 1965 a été faite sur les pêchers non irrigués par observation de profils parallèles au sens du défoncement ; elle s'est poursuivie en 1966 sur les pêchers irrigués. Pour permettre une étude de la répartition des racines suivant les différents horizons, l'observation a été complétée, dans le cas des arbres irrigués seulement, par l'observation de profils perpendiculaires au sens du défoncement.

Pour la comparaison des groupes irrigués et non irrigués on a considéré seulement les profils orientés parallèlement.

Bien que les enregistrements aient été faits chaque année par une équipe distincte, cela n'a pas introduit de différences appréciables d'une année sur l'autre.

a) *Caractéristiques de l'enracinement.*

Caractéristiques	Désignation	Pêchers irrigués profils parallèles		Pêchers non irrigués profils parallèles	
		Moyennes	Extrêmes	Moyennes	Extrêmes
Cote de la racine la plus profonde	L	53 cm	27-72 cm	61 cm	40-95 cm
Cote de la racine la moins profonde .	l	11 cm	5-20 cm	15 cm	8-30 cm
Épaisseur exploitée L — l	y_4	42 cm	22-60 cm	47 cm	28-75 cm
Nombre total de racines dans 1 m de longueur de profil	N	125	32-247	57	20-109
Rapport du nombre de racines dans les 20 premiers centimètres au nombre total (%)	q	53		46	
Indice de régularité de l'enracinement.....	x_2	0,45	0,25-0,78	0,35	0,19-0,58
Densité (nbre de racines/m² profil) .	d	298	120-410	118	30-200

b) *Liaisons : techniques culturales – caractéristiques de l'enracinement.*

Liaisons	Pêchers non irrigués (profils parallèles)	Pêchers irrigués (profils parallèles)
Cote de la racine la plus profonde – profondeur défoncement x_3	$r = 0{,}84$ — seuil 1 % $L = 0{,}60\ x_3 + 24{,}5$	n. s.
Cote de la racine la moins profonde – profondeur travail superficiel t ..	n. s.	$r = 0{,}60$ — seuil 1 % $l = 0{,}85\ t + 1{,}65$
épaisseur exploitée – ..... profondeur défoncement x_3	$r = 0{,}64$ — seuil 1 % $y_4 = 0{,}46\ x_3 + 19{,}2$	$r = 0{,}91$ — seuil 1 % $y_4 = 0{,}27\ x_3 + 27{,}1$
Nombre total de racines – ..... épaisseur exploitée	n. s.	$r = 0{,}71$ — seuil 1 % $N = 3{,}4\ y_4 - 18{,}2$

n. s. non significatif.

Pour les arbres irrigués l'absence de liaison entre les cotes de la racine la plus profonde et la profondeur de défoncement peut s'expliquer par un intervalle de variation plus réduit de la variable x_3 = 40 à 75 cm (moyenne = 51 cm) contre 20-80 cm (moyenne 60,5 cm) pour les pêchers non irrigués.

C'est pour les seuls arbres irrigués que la liaison cote de la racine la plus superficielle – profondeur du travail superficiel est significative, quoique l'irrigation favorise la croissance des racines dans la couche travaillée entre deux passages de canadien. Cette liaison peut s'expliquer par une fréquence plus élevée de ces passages effectivement constatée (1) qui empêcherait les racines de se développer dans la couche superficielle.

(1) Le canadien est passé après chaque irrigation.

La liaison épaisseur exploitée — nombre de racines n'existe que pour les arbres irrigués, vraisemblablement parce que la régularité de l'enracinement y est plus grande ($x_2 = 0{,}45$ contre 0,35 pour les arbres non irrigués).

c) *Répartition globale des racines dans le profil.*

Que le sol soit ou non irrigué, la répartition moyenne des racines est sensiblement identique dans les 20 cm supérieurs de l'épaisseur exploitée et dans le reste de cette épaisseur (fig. 16).

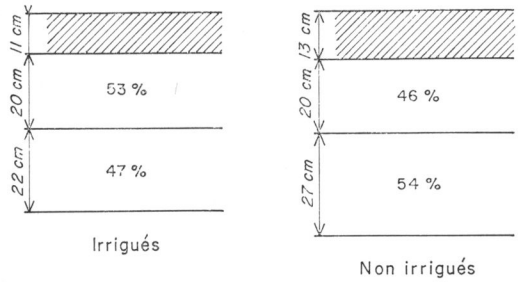


FIG. 16. — *Répartition du nombre de racines dans le profil dans le cas des sols irrigués et non irrigués*

Le nombre de racines dans les 20 cm supérieurs est indépendant de l'épaisseur exploitée et du nombre de racines au-dessous de 20 cm.

Par contre, au-dessous des 20 cm supérieurs le nombre de racines n est en liaison significative au seuil 1 p. 100 avec l'épaisseur exploitée y_4.

pêchers non irrigués : $n = 0{,}71\ y_4 - 5$ (profils parallèles)
pêchers irrigués : $n = 2{,}72\ y_4 + 49{,}8$ (profils parallèles)

d) *Indice de régularité globale de l'enracinement.*

C'est le rapport du nombre de carreaux de 7 cm de côté contenant au moins une racine, au nombre total de carreaux existant dans l'épaisseur exploitée. Cet indice x_2 qui croît avec la régularité d'enracinement varie entre 0 et 1.

Lorsque le profil est examiné parallèlement au sens du défoncement, l'indice des arbres irrigués est supérieur à celui des arbres non irrigués au seuil 5 p. 100 ce qui indiquerait que l'irrigation favorise le développement des racines dans des sols normalement assez cohérents à l'état sec. Pour les seuls sols irrigués (examen perpendiculairement au défoncement) il y a une corrélation positive entre cet indice et l'épaisseur exploitée. Peut-être s'agit-il là d'un effet indirect, les épaisseurs les plus grandes correspondant à des sols initialement profonds où les cailloux moins nombreux constituent moins d'obstacles à une installation régulière des racines.

e) *Densité radiculaire globale et par zone.*

La densité des racines de l'ensemble du profil est le quotient du nombre de racines par la surface totale du profil exprimée en m². La valeur moyenne pour les pêchers irrigués, 298 (extrêmes 120 et 410) est supérieure à celle des pêchers non irrigués, 118 (extrêmes 30 et 200) au seuil 1 p. 100.

Si on considère l'épaisseur exploitée (profils examinés parallèlement au défoncement pour les pêchers non irrigués et perpendiculairement pour les irrigués) la présence de matière organique introduit des différences significatives au seuil 5 p. 100 au moins, la densité étant supérieure dans les horizons organiques.

Pour les pêchers irrigués seulement (profils perpendiculaires), les constatations suivantes ont été faites :

— la densité décroît régulièrement avec l'âge, que l'horizon soit ou non organique (régression significative avec une probabilité inférieure à 5 p. 100).

Si l'on considère les racines d'un diamètre supérieur à 5 mm, leur densité reste sensiblement constante lorsque l'âge varie. Les variations observées sur l'ensemble des racines sont donc à attribuer essentiellement aux racines de diamètre inférieur.

Comme les observations sont toujours faites à la même distance on peut admettre que l'arbre émet des radicelles de plus en plus éloignées de l'axe du tronc.

— La densité est toujours supérieure dans les horizons organiques (seuil 1 p. 100 pour les vergers de 4 à 9 ans, 5 p. 100 de 10 à 12 ans, 10 p. 100 de 13 à 20 ans), et ce, quelle que soit la taille des racines.

— Si l'on considère dans l'épaisseur exploitée les 20 cm supérieurs et la partie en dessous, il y a plus de racines dans la couche organique que dans la couche non organique : en surface avec une probabilité de 10 p. 100 et en profondeur de 1 p. 100. Il y a plus de racines en surface qu'en profondeur : dans l'horizon organique probabilité de 10 p. 100, dans l'horizon non organique 1 p. 100.

L'interaction matière organique-cote des racines, significative à une probabilité inférieure à 1 p. 100, traduit une décroissance moindre de la densité en profondeur lorsqu'on reste dans la couche organique (fig. 17).

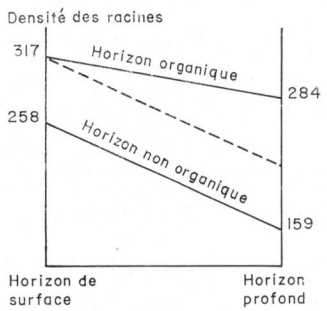


FIG. 17. — *Densité des racines. Interaction matière organique-cote des racines*

f) *Relations rendement – caractéristiques de l'enracinement.*

L'épaisseur exploitée et l'indice de régularité de l'enracinement ont été essayés comme variables dans la régression multiple du rendement.

— Pêchers non irrigués (examen de profil parallèle au défoncement). Aucune de ces variables n'a été retenue au terme de l'analyse de variance. Cependant la corrélation simple épaisseur exploitée-section de couronne ($r = 0{,}32$) étant significative avec une probabilité inférieure à 5 p. 100 et la section de frondaison étant retenue, il est possible que la liaison épaisseur exploitée-rendement soit traduite par la liaison section de couronne-rendement.

— Pêchers irrigués. Si l'on considère les mesures effectuées perpendiculairement au défoncement, l'épaisseur exploitée intervient significativement dans la régression du rendement (coefficient de régression partiel de 0,326 t/ha par cm d'épaisseur exploitée). Il est possible que cette liaison traduise en partie l'effet de la régularité de l'enracinement, puisque épaisseur exploitée et indice de régularité sont en corrélation simple significative ($r = 0{,}49$; $P < 0{,}05$). Remarquons enfin que la mesure de l'épaisseur exploitée effectuée parallèlement au défoncement n'est pas retenue dans la régression multiple, ce qui traduit le caractère inadéquat de la mesure ainsi réalisée.

D'une façon générale si toutes les constatations faites dans cette étude de l'enracinement ne sont pas toujours facilement interprétables, on retiendra l'effet positif extrêmement net de la présence de matière organique sur la densité des racines.

Il est difficile d'attribuer à l'irrigation le fait que certaines liaisons n'existent que pour les pêchers irrigués ou non irrigués ; en effet, certaines caractéristiques ne sont pas comparables (profils parallèles ou perpendiculaires au défoncement) ou sont différentes (fréquence de passage de canadien, profondeur de défoncement). On remarque cependant que la liaison rendement-épaisseur exploitée, constatée pour les sols irrigués seulement, se produit avec des enracinements plus denses et plus réguliers que ceux des sols non irrigués, ce qui tendrait à montrer un effet spécifique de l'irrigation (1).

CONCLUSIONS

Nous envisagerons successivement les conclusions portant sur les résultats techniques et celles intéressant la méthode utilisée.

A. — *Les résultats techniques*

Nous examinons l'action sur le rendement de 1966 des facteurs que nous avons étudiés : âge, circonférence du tronc, section de couronne, épaisseur de sol exploitée, régularité de l'enracinement, pente, texture, taux de cailloux, profondeur de défoncement, densité de plantation, dose annuelle et ancienneté de l'irrigation, déficit en eau, excès d'eau, fumure minérale et organique.

Caractéristiques de l'arbre.

Sur les données analysées au moyen de la régression multiple, il n'a pas été possible de mettre en évidence des relations significatives entre la circonférence du tronc et le rendement. Dans le cas des pêchers irrigués la corrélation simple circonférence-rendement est même quasi nulle ; dans ce cas-là cette variable ne peut pas transmettre au rendement l'effet du milieu et des techniques. La liaison circonférence du tronc-rendement n'a donc pas le caractère général qu'on lui attribue parfois, ce qui justifie *a posteriori* les efforts faits pour prendre en considération le rendement (2).

(1) Cette manière de voir n'est pas incompatible avec l'absence de liaison constatée dans le cadre d'une étude menée parallèlement sur le cerisier non irrigué, quoique les épaisseurs exploitées soient mesurées dans les meilleures conditions, c'est-à-dire, perpendiculairement au défoncement.

(2) La liaison rendement-circonférence du tronc n'a été trouvée que pour une variété sur trois dans un travail de ce genre réalisé sur pêcher en Australie (L. BALAAM et J. CORBIN, 1962).

Lorsque les arbres ne sont pas irrigués, le rendement croît avec l'âge seulement, tandis qu'avec l'irrigation, la section de couronne et l'épaisseur de sol exploitée interviennent positivement. Il est plausible d'attribuer cette disparité d'effet à l'irrigation : le volume de la couronne pourrait être relativement indépendant du milieu du fait de l'irrigation et donc avoir un effet spécifique sur le rendement ; l'intervention de l'épaisseur de sol exploitée peut être due à la régularité et à la densité plus grande des racines effectivement constatées lorsque l'irrigation est pratiquée.

Milieu.

La pente a un effet dépressif sur le rendement en l'absence d'irrigation seulement, ce qui tendrait à indiquer que la pente intervient surtout sur l'alimentation en eau en augmentant le ruissellement, ou en limitant le volume de terre prospecté par les racines.

Les types de texture de la terre fine ne paraissent pas intervenir, encore qu'un effet dépressif des sols les plus lourds ne soit pas à exclure pour les arbres irrigués. Par contre, les éléments grossiers ont un effet dépressif seulement lorsque les sols ne sont pas irrigués : on peut penser que l'effet de la diminution de capacité de réserve due à la présence de cailloux est atténué par l'irrigation.

Une structure du sol continue et assez cohérente à l'état sec provoque un enracinement assez irrégulier ; en maintenant plus longtemps le sol humide l'irrigation tendrait à réduire cet inconvénient, ce qui serait confirmé par la plus grande régularité de l'enracinement.

L'excès d'eau, quelle que soit son origine, est une cause de mortalité importante.

Techniques.

L'apport de matière organique en entretien, c'est-à-dire dans la couche superficielle de sol est sans action, du moins à court terme, si le niveau organique au moment de la plantation est convenable. Par contre, l'effet positif considérable de la matière organique sur le développement et la prolifération des racines justifie amplement une incorporation de matière organique sur toute l'épaisseur de sol au moment de la plantation.

La profondeur de défoncement, sans action sur les rendements pour les sols non irrigués, a un effet dépressif lorsque les sols sont irrigués, ceci pour des profondeurs en grande majorité au-delà de 40 cm. Du fait de la complexité d'action du défoncement et surtout de la gamme étroite de variation de sa profondeur on ne peut aller au-delà des constatations précédentes et notamment déterminer l'existence éventuelle d'une profondeur optimum.

Il y a presque régulièrement un déficit de la pluviométrie sur l'évapotranspiration que l'eau en réserve dans le sol ne peut totalement combler : l'eau est de ce fait un facteur limitant de la production. Dans ces conditions il est surprenant de ne pas avoir décelé d'influence de l'irrigation. Ceci tient certainement à la façon d'aborder le problème : l'irrigation est caractérisée seulement par une dose annuelle moyenne et un indice indiquant depuis combien de temps l'arbre est irrigué. Il n'a pas été tenu compte de modalités comme le volume de chaque irrigation, leur date, le mode d'apport de l'eau. De plus la gamme de variation des doses annuelles est mal adaptée à la mise en évidence d'un effet positif de l'irrigation, beaucoup d'entre elles

étant élevées au point d'avoir un effet dépressif probable dans ces sols en majorité légers, peut-être en raison d'un lessivage.

Il est vraisemblable que la diversité des modalités d'apport de la fumure azotée (forme, époque, fractionnement) a masqué l'influence de la quantité apportée ; il est possible aussi que les apports réguliers importants de matière organique aient atténué les effets de la fumure minérale azotée, du fait de la minéralisation de la matière organique.

En définitive, certains facteurs interviennent de façon certaine sur le rendement à savoir : la pente, la teneur en cailloux dans le cas des vergers non irrigués, l'épaisseur de sol exploité et le défoncement pour les irrigués, et l'excès d'eau dans tous les cas. D'autre part la plus grande densité des racines dans les zones riches en matière organique est un résultat acquis.

Quant aux autres facteurs, dont on n'a pas décelé l'action, on ne peut conclure qu'ils soient tous sans influence. C'est en particulier le cas de l'irrigation dont il est difficile d'admettre que son action se limite à modifier l'effet de certains facteurs (pente, teneur en cailloux, épaisseur exploitée) sur le rendement sans agir directement sur lui. C'est peut-être également le cas de la fertilisation minérale et de la densité de plantation. Pour ces derniers facteurs une enquête portant plus particulièrement sur ceux-ci et parfois une expérimentation nous paraissent nécessaires.

B. — *La méthode*

En ce qui concerne la méthode utilisée il faut noter d'abord l'importance de la façon d'étudier chaque facteur. Il est possible de le faire intervenir sous une forme qualitative (classification des rendements selon les différentes textures) ou quantitative (introduction comme variables des classes granulométriques dans une régression multiple de calcul des rendements) et les résultats peuvent ne pas être identiques. Pour caractériser une technique il est souvent nécessaire d'utiliser plusieurs paramètres ou données qualitatives (une fumure se définit par la quantité d'engrais apportée et par les modalités d'apport) ; les modalités variables d'un point à un autre sont souvent mal connues ou difficiles à traduire de façon qualitative, ce qui risque d'atténuer l'effet de la variable quantité. Dans un ordre d'idée analogue, la façon de réaliser les mesures peut modifier les résultats : le fait que pour une même population le rendement ne soit en liaison avec l'épaisseur exploitée que si la mesure de cette dernière est faite d'une certaine façon est à cet égard significatif. On ne saurait donc trop insister sur ce premier stade de l'enquête que constitue le choix des variables à considérer, la façon de les faire intervenir et la manière de les appréhender ou de les mesurer.

Lors du dépouillement il est souvent difficile de réaliser des comparaisons de rendement réellement homologues correspondant aux divers états d'un facteur A, un autre facteur B pouvant intervenir de façons différentes suivant les états de A (interactions A et B ou échantillon particulier) ; l'expression de l'effet propre de A peut ainsi être altérée, d'où des erreurs d'interprétation considérables [1]. Lors de l'analyse de variance d'une régression multiple une difficulté analogue provient des

[1] Que le calcul statistique ne permet pas d'éviter.

corrélations existant fréquemment entre les variables dites indépendantes : on ne peut donc analyser l'effet d'une variable indépendamment des autres.

Rappelons que l'utilisation de la régression multiple revient en quelque sorte à plaquer sur le réseau complexe d'interrelations que constitue la réalité, un modèle mathématique simple qui peut la distordre sensiblement. Quelle que soit la méthode de dépouillement utilisée, il est nécessaire de disposer d'un échantillon important. On ne saurait trop souligner à cet égard que la quantité d'information disponible dans un échantillon d'effectif donné peut être répartie de façon différente : par exemple, il est possible d'avoir soit peu d'information sur un grand nombre de facteurs, soit une information plus importante sur un nombre réduit de facteurs (ce qui revient à opérer avec des niveaux constants des facteurs non étudiés, ou à avoir de bonnes raisons de les considérer comme sans action). On peut également ne pas considérer certaines sous-populations (par exemple les pêchers non irrigués).

C'est au moment de l'interprétation proprement scientifique ou technique que se présentent les difficultés les plus grandes. Elles résultent en grande partie d'aspects déjà évoqués précédemment, mais aussi du fait que l'on ne maîtrise pas la variation des facteurs quantitatifs comme dans l'expérimentation : l'étendue de variation existant dans la région peut être insuffisante pour mettre en évidence l'effet d'un facteur ; la fréquence des données peut être différente d'un intervalle à l'autre de la gamme de variation, ce qui amène une distorsion entre les relations trouvées et la réalité. Dans ces conditions il est nécessaire de ne conclure qu'avec prudence après avoir essayé de corroborer les conclusions par tous les moyens possibles (convergence de résultat, considérations théoriques ...). Il peut être nécessaire dans certaines situations de recourir à des observations complémentaires ou à des expérimentations au champ ; dans ce dernier cas, l'enquête a souvent permis de poser convenablement le problème, ce qui n'est pas un résultat négligeable.

L'enquête apparaît comme un moyen d'étude des facteurs de production dans une région, qui ne saurait se suffire à lui-même. Son intérêt essentiel est d'aboutir, après une phase d'analyse, à une prise en considération simultanée des éléments constitutifs du milieu et des techniques, éléments souvent liés et qu'il est donc dangereux de considérer isolément. Cette étude globale de la réalité permet de détecter des facteurs de progrès sur lesquels on peut agir rapidement et de préciser l'importance de leur action sur le rendement.

Une telle enquête pour imparfaite qu'elle soit, permet d'orienter avec de meilleures chances de succès les modifications de techniques ou de systèmes de culture rendues nécessaires par l'évolution des conditions économiques ou sociales.

Reçu pour publication en décembre 1967.

REMERCIEMENTS

Nous remercions la Chambre d'Agriculture de l'Ardèche pour l'aide qu'elle nous a apportée et pour le concours éclairé de MM. POURRAT, ROBERT et POPON, ainsi que les exploitants et responsables locaux dont la compréhension et la participation ont grandement facilité le travail sur le terrain. Enfin, nos remerciements vont aux élèves de l'I. N. A. qui, à l'occasion de leur troisième année, nous ont efficacement aidé tout au long du déroulement de l'enquête, : M. JOUVE, OSTY, de MONTARD, COSTES, DALLE, BROSSIER, THOMAS, BARBET et HUMBERT.

SUMMARY

THE TECHNICAL FACTORS GOVERNING THE PRODUCTION OF LATE-VARIETY OF PEACHES IN THE MIDDLE VIVARAIS (FRANCE)

Within the scope of a comprehensive survey of the agricultural produces of a given area, the authors endeavoured to find out by sampling which of the factors relating to the physical environment or to agricultural engineering would provide utmost increases in the production of late-variety peaches.

The method used enabled to highlight the effects of various factors on yields such as, for unirrigated trees, the gradients involved and the stoniness of the ground ; for irrigated trees, the ploughed depth (after land clearing) and the depth of soil utilized by their roots and, in both instances, the features of the soil.

Other factors take no effect on yields, e. g., soil texture or organic matter supplied to the land by husbandry. The part played by other factors, such as irrigation, fertilizing and sizes of the trees, could not be defined very accurately owing to the relevant problems the method involved.

When proceeding with this survey, the authors attempted to define clearly the value and limiting values of the type of investigation selected.

ZUSAMMENFASSUNG

DIE TECHNISCHEN FAKTOREN DER SPATPFIRSICHERZEUGUNG IM MITTLEREN VIVARAIS

Im Rahmen der Gesamtuntersuchung über die landwirtschaftlichen Erträge eines Gebietes bemühten sich die Verfasser, unter der Gesamtheit der Faktoren, die an das physische Milieu an die technischen Verfahren gebunden sind, zu untersuchen, welche von ihnen die grösste Zunahme der Spätpfirsicherzeugung sicherzustellen vermögen.

Die angewandte Untersuchungsmethode gestattet, die Wirkung gewisser Faktoren auf die Erträge hervorzuheben. Dies gilt besonders in Bezug auf die nicht bewässerten Bäume für die Böschung, den Kieselrat ; für die bewässerten Bäume, die Tiefe des Tiefpflügens. die Dicke des von den Wurzeln genützten Bodens, und in beiden Fällen die Eigenheiten der Bodenbeschaffenheit.

Andere Faktoren erweisen sich ohne Wirkung auf den Ertrag : so u. a. Textur der Feinerde, die Ablagerung von organischem Unterhaltungsmaterials. Schliesslich für andere Faktoren kann deren Wirkung auf die Erträge infolge Schwierigkeiten bezüglich der angewandten Untersuchungsmethode nicht bestimmt werden, nämlich für die Bewässerung, die Düngung, den Baumschnitte.

Gelegentlich dieser Analyse waren die Verfasser bemüht das Interesse und die Grenzen der gewählten Untersuchungsmethode zu bestimmen.

РЕЗЮМЕ

Технические факторы продукции позднеспелого персика в провинции « Средний Вивараз ».

Ж. П. ДЕФФОНТЭН, Р. ГРА.

В кадре общего изучения сельскохозяйственной продукции одной области, среди суммы факторов связанных с физической средой и техническими приемами, авторы попытались изолировать при помощи анкет те из них, которые влияют на получение наибольших прибавок продукции позднеспелых персиков.

Примененный метод позволил выявить эффект некоторых факторов на урожайность, в частности — склонов и каменных нагромождений у не орошаемых деревьев, — глубины вспашки, толщины слоя почвы занятого корнями — для деревьев орошаемых, и характера почвенной структуры — в обоих случаях.

Некоторые другие факторы не оказывают, наоборот, никакого влияния на урожайность, как например механический состав мелкой почвы, внесение органического вещества... И, наконец, существуют еще факторы, влияние которых на урожайность нельзя с точностью установить ввиду относительной трудности примененной методики, в частности : ирригация, удобрение, обрезка деревьев...

В рамках этого анализа авторы пытаются также с точностью определить интерес и возможности анкет данного типа.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANNE P., 1945. Sur le dosage rapide du carbone organique des sols. *Ann. agron.*, **15**, 161-172.

BALAAM L., CORBIN J., 1962. *A report and statistical analysis of factors affecting the yields of canning peaches on the Yanco n° 1 irrigation area.* School of Agriculture. University of Sydney.

BOURRIER J., 1959. *Problème posé par la présence des cailloux dans les sols irrigués.* Direction générale du Génie rural et de l'Hydraulique agricole. Imprimerie nationale, Paris.

COLLIER D., 1961. Mise au point sur les processus de l'altération des granites en pays tempérés. *Ann. agron.*, **12** (3), 273-331.

DEFFONTAINES J.-P., 1967. Influence de l'excès d'eau sur des vergers de pêchers en Moyen Vivarais. *C. R. Acad. Agric.*, **12**.

DEFFONTAINES J.P., de MONTARD F., 1968. Essai d'interprétation du danger d'érosion dans les vergers de fortes pentes en moyen Vivarais. Ann. agron., à paraître.

FOURNIER F., 1960. *Climat et érosion.* La relation entre l'érosion du sol par l'eau et les précipitations atmosphériques. P. U. F. Paris.

GRAS R., 1962. Quelques observations sur les relations entre les propriétés physiques du sol et la croissance du pêcher dans la vallée du Rhône entre Vienne et Valence. *Ann. agron.*, **13** (2), 141-174.

GOODE J., HYRYCZ K., 1964. The response of *Laxton superb* apple trees to different soil moisture conditions. *J. hortic. Sci.*, **39** (4), 254-276.

HÉNIN S., et *al.*, 1958. Méthode pour l'étude de la stabilité structurale des sols. *Ann. agron.*, **28**, 71-90.

HÉNIN S., et *al.*, 1960. *Le profil cultural. Principe de physique du sol.* Société d'édition des Ingénieurs agricoles. Paris.

MONNIER G., TURC L. et *al.*, 1962. Une méthode de fractionnement densimétrique par centrifugation des matières organiques du sol. *Ann. agron.*, **13**, 55-63.

TURC L., 1961. Évaluation des besoins en eau, évapotranspiration potentielle. *Ann. agron.*, **12**, 13-14.

Ann. agron., 1968, **19** (1), 53-64.

QUELQUES OBSERVATIONS SUR LES MODALITÉS DE CONTAMINATION PAR LES RETOMBÉES RADIOACTIVES D'UNE PARCELLE DE LUZERNE EN 1964

Claude MADELMONT, Marie-Louise DABURON, Fanny ALLIN, Liliane CAPPELLINI et Suzanne BERTRAND

Commissariat à l'Énergie atomique,
Département de la Protection sanitaire,
Section de Contrôle sanitaire, 92 - Fontenay-aux-Roses

SOMMAIRE

La contamination radioactive de la production fourragère d'une parcelle de luzerne par les retombées dues aux explosions aériennes soviétiques et américaines de 1962 est observée au cours de l'année 1964. A cette époque la contamination est essentiellement directe, elle est en étroite relation avec la radioactivité β artificielle de l'air et la pluviométrie pendant le mois précédent la coupe.

INTRODUCTION

Au cours de l'année 1964, une étude conduite en collaboration avec la Station de Recherches sur l'Élevage des Ruminants du Centre national de Recherches zootechniques a permis au Domaine expérimental de La Minière (Yvelines) d'observer quelques modalités de transfert des radio-éléments issus des retombées radioactives au niveau de la chaîne alimentaire et notamment au stade alimentation animale-production laitière.

Dans le cadre de cette étude qui fera l'objet d'une autre publication, l'évolution de la contamination de la production d'une parcelle de luzerne a pu être suivie.

Ces résultats particuliers, qui peuvent présenter un intérêt sur le plan de l'hygiène atomique, sont analysés et interprétés dans cet article. Les mesures faites sur l'air et sur les données pluviométriques ont permis d'expliquer les variations observées.

PRÉLÈVEMENTS ET MÉTHODES D'ANALYSE

Air

Les mesures de radioactivité β globale sont effectuées quotidiennement à partir des filtres prélevés sur une station de pompage à moyen débit (PHILIPPOT, 1962) située à la ferme expérimentale.

Le principe de la méthode de mesure est celui du temps de comptage à durée contrôlée (PHILIPPOT, 1963) qui permet d'éliminer l'activité due aux éléments naturels.

Pluviométrie

Les mesures sont faites localement par la ferme qui possède sa station d'observation météorologique.

Luzerne

Semée en 1963 la luzerne est récoltée par coupes successives du 30 avril 1964 au 24 octobre 1964. Le prélèvement des échantillons a débuté au cours de la semaine du 10 au 16 mai.

La parcelle est divisée en deux parties. Sur la première partie, des bandes successives de fourrage sont fauchées à raison d'une par jour et selon les quantités de fourrage nécessaires aux animaux. Lorsque la dernière bande est fauchée et que la coupe est reprise sur la première bande, on obtient à partir de ce moment de la luzerne à âge constant. Il y a en effet le même décalage de temps entre la première coupe et la deuxième coupe de chaque bande.

Sur la deuxième partie, la première coupe de fourrage est écartée ; on obtient ensuite de la luzerne à âge variable par la coupe de bandes successives.

C'est l'alternance de ces deux protocoles de coupe qui a permis d'obtenir tout au long de cette expérience, soit de la luzerne à âge variable, soit de la luzerne à âge constant. Les quatre périodes où la luzerne à âge variable est distribuée sont appelées 1er, 2e, 3e et 4e cycle.

Les analyses sont effectuées sur des échantillons composites réalisés à partir de prélèvements quotidiens égaux en poids de matière sèche récoltée au cours d'une même semaine.

La matière sèche est estimée par déshydratation jusqu'à poids constant à l'étuve à 105°C.

Les cendres sont obtenues par calcination de la matière sèche par passage à l'étuve à 180°C et au four électrique à 450°C, température à laquelle le césium des cendres ne se volatilise pas.

Sur les cendres sont déterminées :

— les teneurs en calcium par gravimétrie de l'oxalate de calcium,

— les teneurs en produits de fission qui sont le ^{144}Ce, le ^{54}Mn et le ^{137}Cs, ainsi que l'isotope 40 du potassium naturel, par spectrométrie γ à l'aide d'un cristal d'iodure de sodium activé au thallium et d'un analyseur de 400 canaux ;

— les teneurs en ^{90}Sr à partir de l'activité de ^{90}Y après séparation chimique de l'entraîneur ajouté.

Les détails de ces techniques d'analyses font l'objet du rapport C. E. A. 2339 (COULON et *al.*, 1963).

Les contaminations dues au ^{144}Ce et au ^{54}Mn sont, en raison de leur période radioactive moyenne (205 jours et 290 jours respectivement) toujours rapportées à la date du prélèvement. Il n'est pas fait de correction pour le ^{137}Cs, dont la période est de 30 ans.

RÉSULTATS

L'âge moyen de chaque échantillon composite et hebdomadaire de luzerne, du début à la fin de la récolte, est donné par la figure 1. Le plan de coupe mis en œuvre par les expérimentateurs de La Minière est extrêmement heureux car il permet d'analyser aisément, en raison même de la grande variété de l'âge des prélèvements, l'influence de ce facteur sur les niveaux de contamination.

La variation de la composition minérale du fourrage en calcium et en potassium est représentée par la figure 2. Il est toujours utile de connaître les teneurs de ces

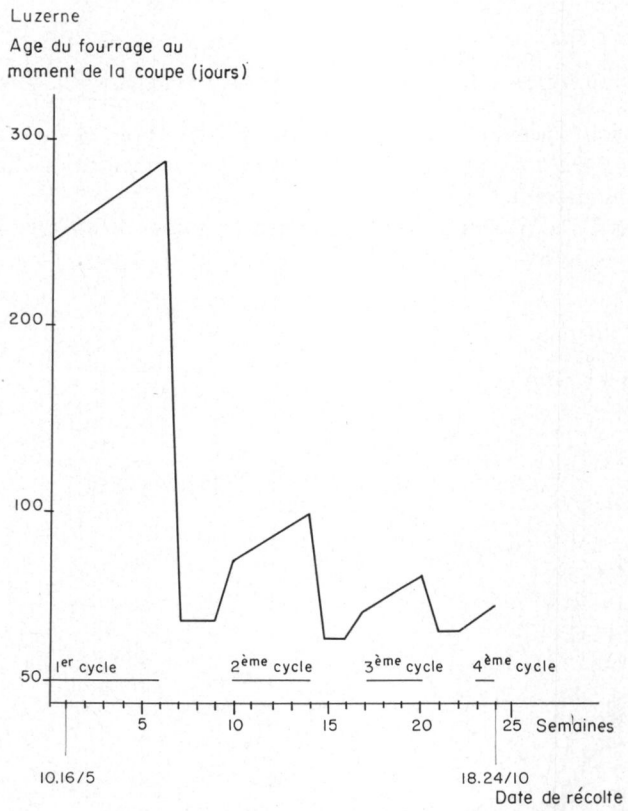


FIG. 1. — *Age moyen de chaque échantillon du début à la fin de la récolte*

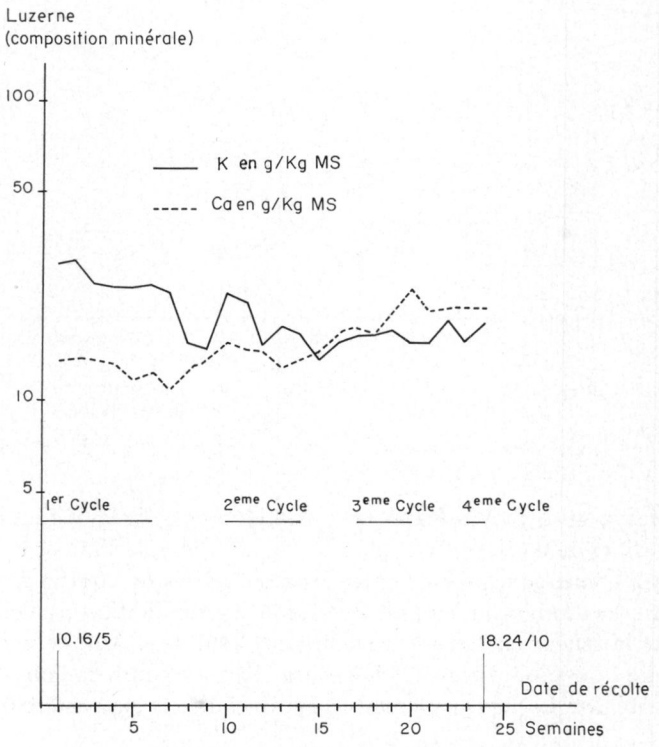


FIG. 2. — *Teneurs en calcium et potassium de la luzerne*

deux éléments, ions spécifiquement compétitifs du strontium et du césium. On peut noter, conformément à ce qui est souvent observé, l'augmentation du calcium et la diminution du potassium.

L'existence d'une liaison de cette composition minérale avec l'âge du fourrage d'une part et avec le rang de coupe d'autre part n'apparaît pas.

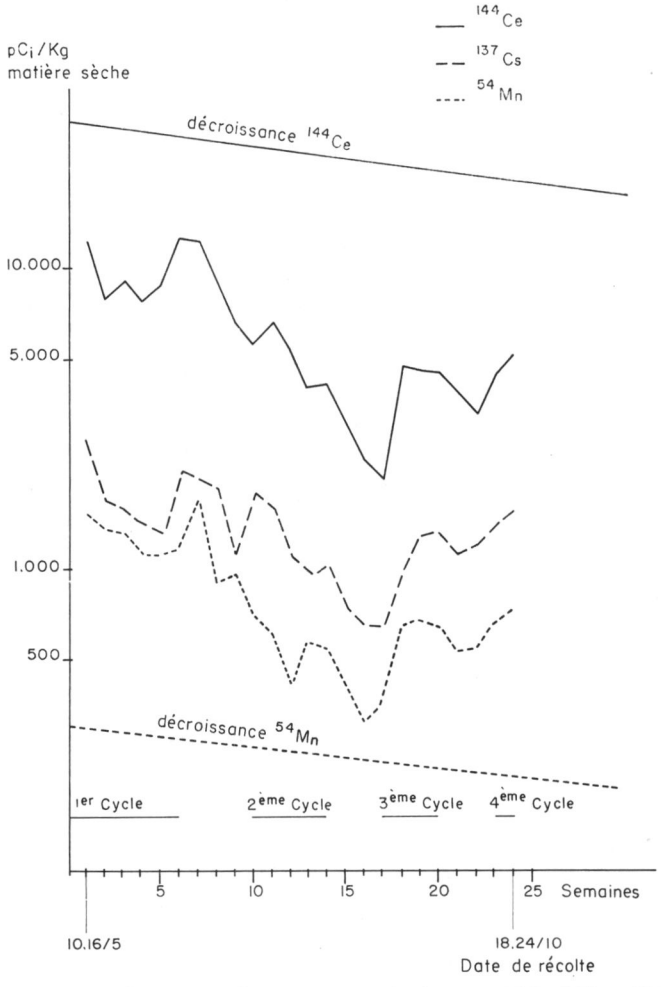


FIG. 3. — *Variations des niveaux de contamination pour* ^{144}Ce, ^{137}Cs *et* ^{54}Mn

Les figures 3 et 4 représentent les variations des niveaux de contamination exprimés en pCi/kg de matière sèche pour le ^{144}Ce, le ^{137}Cs, le ^{54}Mn et le ^{90}Sr. On peut noter une assez bonne concordance entre les trois profils de courbe des émetteurs γ et d'autre part la diminution progressive de la contamination au cours du temps. L'évolution de la teneur en ^{90}Sr est sensiblement analogue. Afin de voir quelle était l'importance de la décroissance du ^{144}Ce et du ^{54}Mn au cours de l'observation, nous avons représenté sur la figure 5 ces mêmes niveaux en supposant que les radio-

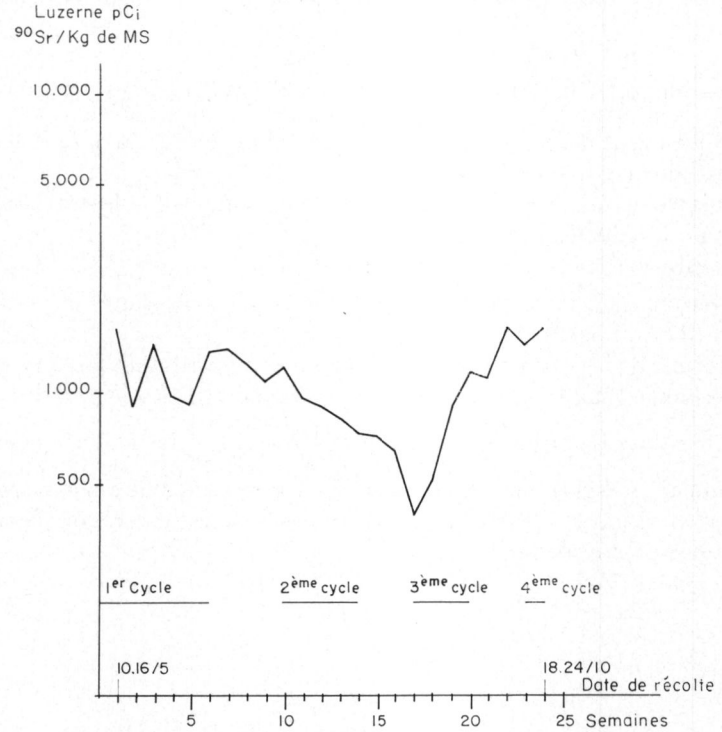


FIG. 4. — *Variations des niveaux de contamination pour* ^{90}Sr

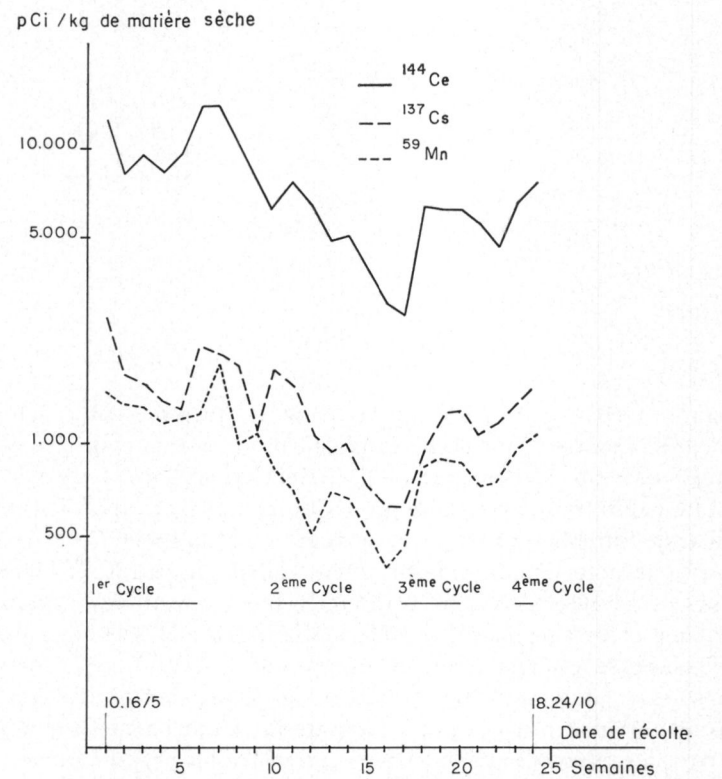


FIG. 5. — *Variations des niveaux de contamination pour* ^{144}Ce, ^{137}Cs *et* ^{54}Mn (^{144}Ce, ^{137}Cs *et* ^{54}Mn *étant supposés de même origine au point de vue date et* ^{54}Mn *et* ^{144}Ce *étant corrigés de leur décroissance*)

éléments provenaient d'une même explosion atomique et en corrigeant leur niveau par la décroissance correspondante.

Ceci montre aisément que la décroissance joue peu et que les variations observées sont dues à d'autres facteurs.

Il faut rappeler ici les faits suivants :

— le cérium 144, terre rare très peu soluble, n'est pratiquement pas absorbé ni par les racines, ni par les feuilles ;

— le césium 137 est peu absorbé par les racines à partir d'un sol doué de quelque capacité d'échange, mais très bien par les feuilles (rapport C. E. A — I. N. R. A., 1962).

— les résultats montrent que le rapport $\frac{\text{pCi } ^{137}\text{Cs/kg}}{\text{pCi } ^{90}\text{Sr/kg}}$ reste pratiquement constant au cours de l'observation (fig. 6) avec une légère tendance à décroître.

On peut en déduire que la contamination observée est en grande partie due à la contamination directe du feuillage.

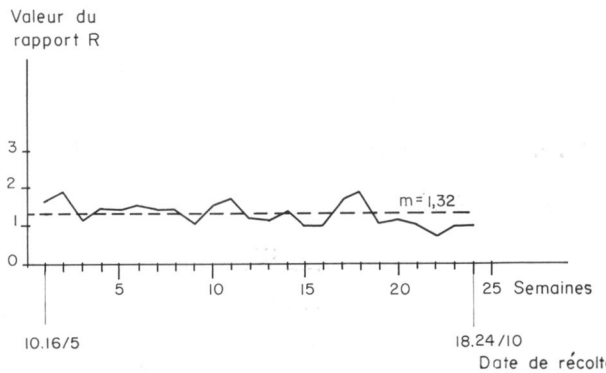


FIG. 6. — *Valeurs du rapport* $R = \frac{\text{pCi } ^{133}\text{Cs/kg}}{\text{pCi } ^{90}\text{Sr/kg}}$ *en fonction du temps*

DISCUSSION

Les figures 3 et 4 rapprochées de la figure 1, qui représente l'âge moyen des parties aériennes, montrent que les niveaux de contamination pour chacun des radioéléments analysés sont indépendants de l'âge de l'échantillon. On peut donc penser que la contamination observée reflète, avec des modalités à préciser, l'évolution de la contamination du milieu physique et surtout de l'atmosphère.

On peut déjà noter que la radioactivité β globale de l'air a sensiblement diminué au cours de la récolte (fig. 7). Ceci est en bon accord avec l'évolution de la contamination du fourrage, mais les profils ne sont pas semblables ainsi que le montre la remontée observée à partir du début du 3e cycle.

Les mesures de pluviométrie n'expliquent pas à elles seules l'évolution observée. Il eût été souhaitable de mesurer près de la parcelle, d'une part les retombées sèches, et d'autre part, les retombées humides pour serrer de plus près les modalités de cette contamination. Les possibilités matérielles ne l'ont pas permis; cependant, avec

quelques hypothèses simples nous nous sommes efforcés d'utiliser les données disponibles. Ces hypothèses sont les suivantes :

— la contamination directe d'un végétal par les retombées radioactives dépend essentiellement des retombées humides, l'influence des retombées sèches est peu importante dans les climats tempérés ;

— le niveau des retombées humides dépend de la hauteur d'eau et de la radioactivité de l'air au moment de la précipitation. En première approximation, on peut admettre que ce niveau est proportionnel à la radioactivité β globale de l'air et à la hauteur d'eau, donc proportionnel au produit ;

— la contamination directe d'un végétal n'est pas le reflet instantané de la contamination du milieu extérieur, elle doit être le reflet de ce qui se passe pendant une période à déterminer avant le prélèvement.

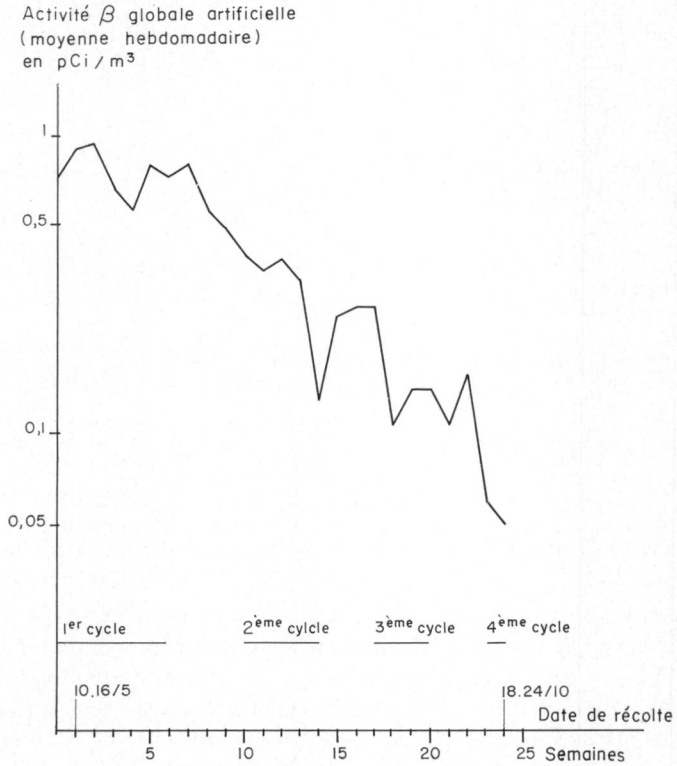


FIG. 7. — *Évolution de la radio-activité β globale de l'air au cours de la croissance de la luzerne*

Partant de ces hypothèses simples, nous avons effectué sur une période de deux, trois, quatre, cinq et six semaines, les sommes des produits hauteur d'eau, radioactivité β globale de l'air précédant la récolte d'un échantillon constitué à partir des prélèvements journaliers.

En comptant la semaine de récolte, nous nous sommes aperçus que la sommation sur quatre semaines donnait une représentation graphique (fig. 8) dont le profil ressemblait le plus aux courbes de la figure 3, un peu moins bien pour la figure 4.

Ce dernier point ne surprend pas, car l'absorption du ^{90}Sr par les racines, quoique

faible en importance, n'est peut-être pas totalement négligeable et sa part peut contribuer à modifier quelque peu la courbe représentant la contamination totale due à ce radio-élément. On peut ainsi expliquer la remontée observée au début du 3e cycle par l'augmentation des précipitations qui serait compensée par la diminution de la contamination de l'air.

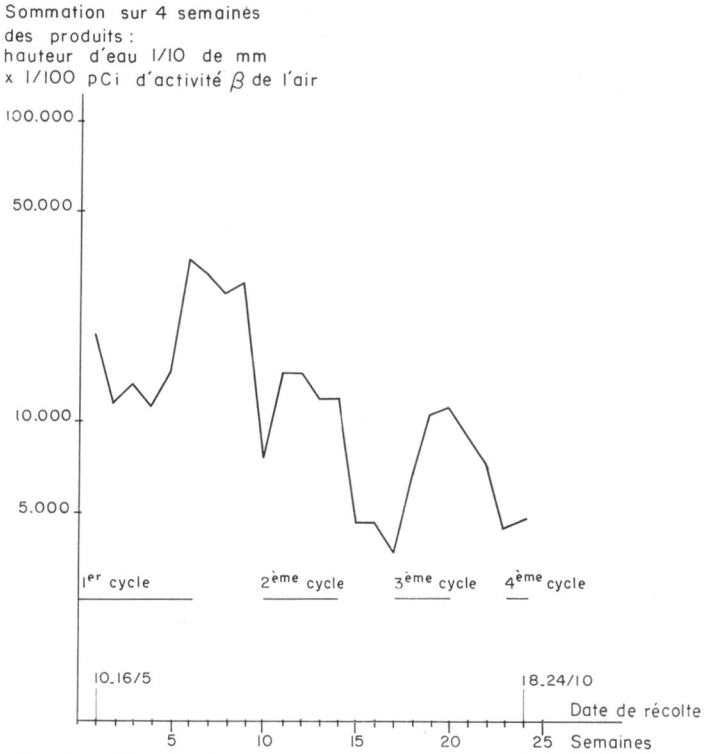


FIG. 8. — *Variation des sommes sur 4 semaines des produits hauteur d'eau, radio-activité β globale de l'air*

Afin de vérifier ces calculs, nous avons utilisé les résultats observés dans d'autres stations (C. E. A. — S. C. R. G. R., 1964) où nous avons pu comparer en sommant en chaque point sur quatre semaines la somme des produits hauteur d'eau radioactivité β globale de l'air d'une part, et la somme sur quatre semaines de la radioactivité déposée par précipitation, d'autre part. Les profils de ces courbes sont nettement comparables et les coefficients de corrélation parfaitement significatifs.

Si la variable y représente l'activité déposée en mCi/km² par voie humide et la variable x le produit hauteur d'eau en 1/10e de mm multiplié par l'activité β globale de l'air en pCi/m³, on a trouvé pour la même période d'observation (10 mai-24 octobre 1964), les équations de droite de régression suivante :

Cadarache $y = 0{,}321\ x + 2{,}664$ (climat méditerranéen)
Le Bouchet $y = 0{,}237\ x + 21{,}189$ (climat océanique)
Saclay $y = 0{,}278\ x + 2{,}138$ — —

On peut donc dire que dans cette étude, l'absence de mesure de radioactivité déposée par voie humide, a pu être en quelque sorte remplacée par la connaissance

de la pluviométrie et des mesures de radioactivité artificielle β globale de l'air. D'autres observations de ce genre permettront par la suite de voir dans quelles conditions et avec quelles restrictions ces relations statistiques pourraient être éventuellement généralisées.

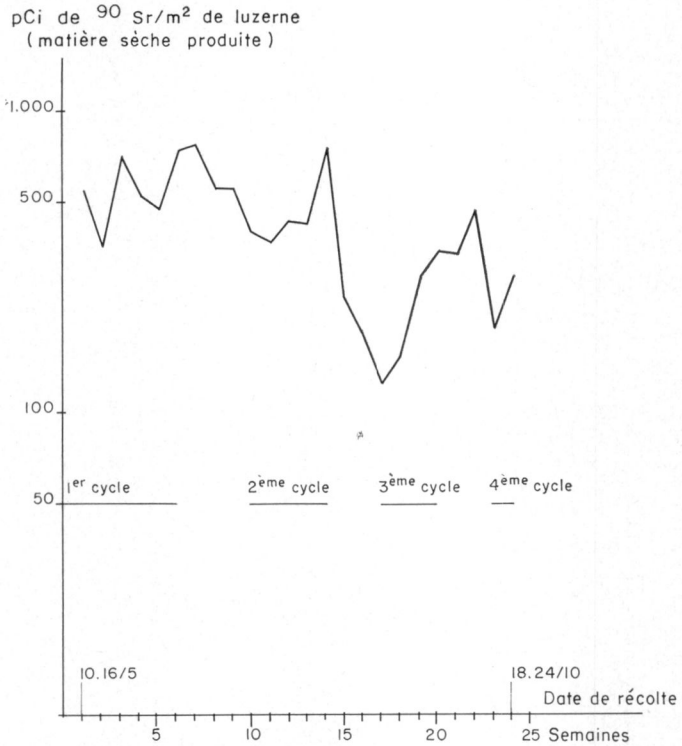


FIG. 11. — *Contamination de la luzerne en* ^{90}Sr, *rapportée au m² de production de M. S.*

Étant donné que la surface foliaire exposée aux retombées n'augmente pas proportionnellement avec le poids de récolte, et que les rendements ont varié au cours de l'observation (fig. 9), on a exprimé dans les figures 10 et 11 la contamination rapportée au mètre carré de production. Les liaisons entre les courbes de ces deux figures et celles de la figure 8 restent toutes significatives (tabl. 1).

TABLEAU I

Relation entre la valeur x = hauteur d'eau × radioactivité β globale de l'air et les diverses contaminations spécifiques de la luzerne exprimées en pCi, rapportées à la matière sèche produite par mètre carré

Nature de la relation	Valeur de *r*	Degrés de liberté	Seuil significatif
x et ^{90}Sr	0,758	22	0,423
x et ^{144}Ce	0,861	—	—
x et ^{137}Cs	0,828	—	—
x et ^{54}Mn	0,745	—	—

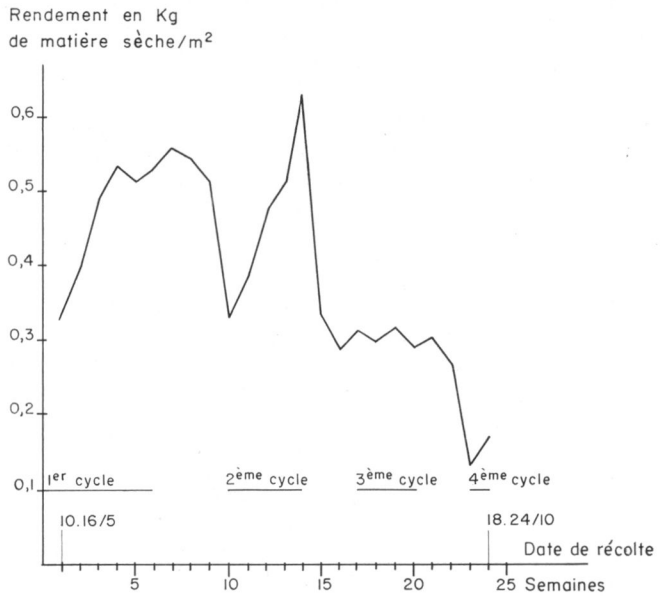


FIG. 9. — *Rendement de la luzerne*

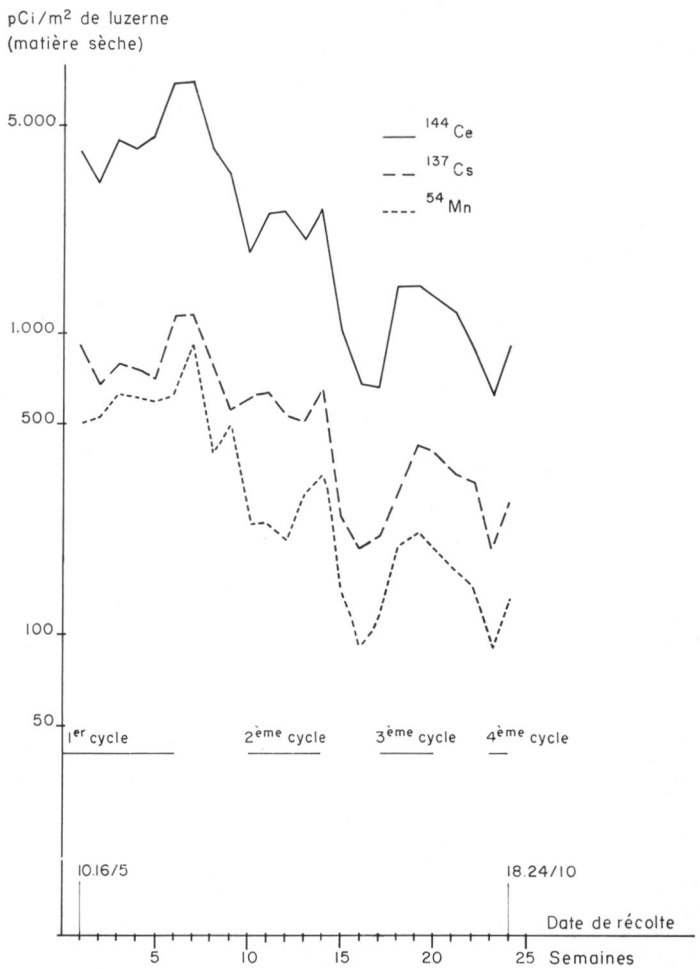


FIG 10. — *Contamination de la luzerne en* ^{144}Ce, ^{137}Cs *et* ^{54}Mn, *rapportée au m² de production de M. S.*

On peut noter cependant que la superposition des profils est plus proche pour le cérium 144. Ceci peut s'expliquer en partie, par les différences de comportement des radio-éléments étudiés à l'égard des surfaces foliaires du végétal. En effet, contrairement au cérium, le césium, le strontium et le manganèse peuvent être absorbés à partir des feuilles (BUKOVAC et *al.*, 1965).

CONCLUSION

On peut déduire des observations faites en 1964 sur la parcelle étudiée que :

— la contamination de la luzerne était principalement une contamination du feuillage, due essentiellement aux retombées humides,

— les niveaux de contamination mesurés reflètent d'assez près les variations des retombées radioactives pendant le mois précédant la coupe du fourrage,

— les mesures de pluviométrie et de radioactivité β globale de l'air ont permis d'avoir une idée valable de l'évolution des retombées humides au cours de cette période.

D'autre part, les faits observés impliquent un comportement différent des divers éléments étudiés en ce qui concerne leur absorption par les organes aériens.

Reçu pour publication en décembre 1967.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier particulièrement M. R. JARRIGE, Directeur de Recherches (C. R. Z. V., Clermont-Ferrand) et M. M. JOURNET, Maître de Recherches qui leur ont permis de mener à bien cette étude ainsi que M. A. HODEN et M. Y. MANIS qui ont eu la responsabilité des prélèvements à la ferme expérimentale de La Minière. Ils expriment leur gratitude à M. G. BARBIER pour l'intérêt qu'il a bien voulu porter à ce travail.

SUMMARY

OBSERVATIONS ON THE CONTAMINATION OF A PLOT OF LUCERNE (1964), BROUGHT ABOUT BY RADIOACTIVE FALL-OUT

The radioactive contamination of the forage of a plot of lucerne contaminated by the radioactive fall-out originated by the American and Soviet air bursts in 1962 was observed during 1964. At that time contamination was mainly direct and closely related with the artificial beta radioactivity of the air and the rainfall that occurred during the month that preceded mowing.

ZUSAMMENFASSUNG

EINIGE BEOBACHTUNGEN ÜBER DIE VERSEUCHUNGSMODALITÄTEN EINER LUZERNENPARZELLE INFOLGE ABSINKEN RADIOAKTIVER SCHWEBSTOFFE IM JAHRE 1964

Die radioaktive Verseuchung der Erzeugung einer Luzernenparzelle durch die Ablagerungen, welche 1962 von sowjetischen und amerikanischen nuklearen Lutfbomben herrühren, wird während des Jahres 1964 beobachtet. Zu jenem Zeitpunkt wirkt die Verseuchung wesentlich direkt. Sie steht in enger Verbindung mit der künstlichen Radioaktivität β der Luft ind mit der im Verlauf des Monats vor dem Schnitt gemessenen Niederschlagsmenge.

РЕЗЮМЕ

Ряд наблюдений над условиями радиоактивного загрязнения делянок люцерны в 1964.

К. МАДЕЛЬМОН И ДР.

Авторы наблюдали загрязнение кормовой продукции делянки засеянной люцерной радиоактивными опадками атомных взрывов советских и американских опытов 1962-го года.

В этот период загрязнение носило исключительно прямой характер, было тесно связанно с искуственной β- активностью воздуха и количеством дождевых осадков выпавших в течении месяца предшествовавшего укосу.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BUKOVAC M. J., WITTWER S. H., TUKEY H. B., 1965. Aboveground plant parts as a pathway for entry of fission products into the food chain with special reference to $^{89-90}Sr$ and ^{137}Cs. *Radioactive fallout, soils, plants, foods, man.* Fowler E. B., éd. Amsterdam, Elsevier, p. 82-109.

COULON R., JEANMAIRE L., MICHON G., 1963. Méthodes d'étude de la contamination radioactive des végétaux. *Rapport C. E. A.*, nº 2339.

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE, 1962. Commissariat à l'Énergie atomique (Département Protection sanitaire). — Compte rendu d'expériences de plusieurs années sur l'absorption du strontium et du césium radioactif par les plantes cultivées. *Rapport C. E. A.*, nº 2159.

PHILIPPOT J. Cl., 1962. Radioactivité artificielle de l'air, résultats acquis en 1961. *Bist.*, nº 64, 64-72.

PHILIPPOT J. Cl., 1963. Aspect nouveau des mesures de radioactivité : mesures isochromes et mesures à durée contrôlée. *Bist.*, nº 70, 75-86.

SURVEILLANCE DE LA RADIOACTIVITÉ ATMOSPHÉRIQUE. Commissariat à l'Énergie atomique. Service de contrôle des radiations et de Génie radioactif, mai, juin, juillet, août, septembre, octobre 1964.

Ann. agron., 1968, **19** (1), 65-82.

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

LES POLYSACCHARIDES DU SOL : ORIGINE, ÉVOLUTION ET RÔLE (1)

J. DECAU

Station d'Agronomie et d'Œnologie, 67, boulevard Deltour, 31 - Toulouse, Institut national de la Recherche agronomique

SOMMAIRE

Après avoir rappelé les principales sources des polysaccharides du sol, l'auteur envisage l'évolution comparée de ces polymères suivant leur origine. Il passe ensuite en revue les différentes fonctions des polysaccharides du sol : action sur l'agrégation des particules minérales et sur le complexage des cations, action sur l'activité microbienne et plus particulièrement sur la dynamique de l'azote, action sur les processus de l'humification.

I. — LES POLYSACCHARIDES : DÉFINITION, CARACTÈRES STRUCTURAUX

Les polysaccharides occupent dans la biosphère, dans le sol notamment, une place importante : 5 à 20 p. cent de la matière organique du sol sont sous forme de polysaccharides (MEHTA, DUBACH et DEUEL, 1961).

Après avoir rappelé la nature chimique de ces composés, nous envisagerons successivement leur origine, leur évolution et leur rôle.

Les polysaccharides sont des polymères de haut poids moléculaire de sucres simples (monosaccharides), d'acides uroniques ou de sucres aminés (HORTON et WOLFROM, 1963).

Rappelons tout d'abord la structure de quelques-uns de ces monomères.

Les sucres simples ou monosaccharides sont des composés carbonés aliphatiques ; ce sont des polyhydroxyaldéhydes (aldoses) ou des polyhydroxycétones (cétoses) dont la chaîne carbonée forme, avec un atome d'oxygène de la molécule, un hétérocycle de type pyrane ou furane.

(1) Deuxième thèse soutenue le 10 juin 1967 à la Faculté des Sciences de Clermont-Ferrand, inscrite sous le numéro E 74

Les chaînes carbonées des glucides peuvent comprendre un nombre variable d'atomes de carbone : de 3 à 8. Les sucres comprenant 5 ou 6 atomes de carbone (pentoses et hexoses) sont les plus largement répandus dans la nature. Ce sont eux qui entrent le plus généralement dans la constitution des polysaccharides.

Nous avons signalé la présence dans les molécules de polysaccharides, à côté des sucres simples, de sucres aminés et d'acides uroniques.

Ces composés diffèrent des sucres simples soit par la substitution, sur le carbone 2, d'une fonction amine à un hydroxyle (ex. D-glucosamine), soit par la substitution, sur le carbone 6, d'une fonction carboxyle à une fonction alcool (ex. Acide D-galacturonique).

Ces monomères sont liés entre eux, dans les polysaccharides, par combinaison de la fonction aldéhyde d'une des molécules avec une des fonctions alcool de la molécule suivante (liaison hémiacétal). Dans la cellulose, par exemple, la fonction aldéhyde d'une unité β D-glucose se combine avec la fonction alcool portée par le carbone 4 de l'unité β D-glucose voisine (liaison 1 → 4) :

Les polysaccharides peuvent être formés par l'association d'unités structurales de même type (homopolysaccharides), comme c'est le cas dans la cellulose, ou par l'association d'unités structurales différentes (hétéropolysaccharides).

Les monomères peuvent être associés en nombre variable dans la molécule des polysaccharides. Ils peuvent aussi former soit une chaîne linéaire, soit une chaîne ramifiée.

C'est ce que montrent les données du tableau 1, établi d'après les données de HORTON et WOLFROM (1963), et dans lequel figurent les caractères structuraux des principaux polysaccharides.

II. — ORIGINE DES POLYSACCHARIDES DU SOL

Nous avons indiqué dans le tableau 1, en même temps que la structure des principaux polysaccharides, leur provenance. Nous voyons que la plupart de ces polymères entrent dans la constitution des végétaux supérieurs ou des microorganismes, tandis qu'un nombre moindre figure parmi les constituants des tissus animaux.

Cependant, ces trois sources de polysaccharides que sont les végétaux, les microorganismes et les animaux contribuent chacune à alimenter le sol en ces polymères.

A. — *Polysaccharides provenant des plantes*

La principale source de polysaccharides est le matériel végétal retournant au sol. Les polysaccharides végétaux sont, pour la plupart, les constituants de la membrane cellulosique, dont ils assurent la rigidité. Cette membrane comprend schématiquement une membrane primaire (lamelle moyenne) constituée de pectine, et une membrane secondaire formée d'hémicellulose et de cellulose.

Mais, certains polysaccharides se trouvent à l'intérieur des cellules dont ils constituent les matières de réserve (amidon, inuline, etc.).

Les polysaccharides des membranes sont de beaucoup les plus abondants : leur proportion dans le végétal atteint souvent, et dépasse même parfois 50 p. 100 du poids sec total.

Dans une paille, par exemple, les polysaccharides représentent les deux tiers environ du poids du matériel végétal (POCHON et DE BARJAC, 1958).

Les poids de résidus de récolte (racines et pailles) laissés par une culture de céréales atteignent souvent 4 à 5 tonnes/hectare; on peut donc évaluer à près de 3 tonnes le poids de polysaccharides annuellement fournis au sol par cette culture.

B. — *Polysaccharides provenant des animaux*

Nombre d'animaux passent au moins une partie de leur cycle de vie dans le sol.

Ces animaux synthétisent divers polysaccharides (acides hyaluroniques, chitine, etc.) qui sont

TABLEAU I

Structure et provenance des principaux polysaccharides

Polysaccharide	Nature des unités de base et des liaisons	Degré de polymérisation	Chaîne	Provenance
Cellulose	βD-glucose (1 — > 4)	> 3 000	linéaire	Végétaux, micro-organismes, quelques animaux inférieurs
Chitine	N-acétyl D-glucosamine (1 ⟶ 4)		linéaire	Champignons Bactéries Insectes
Amidon	αD-glucose (1 ⟶ 4) (1)		linéaire (amylose) ramifiée (amylopectine)	Végétaux Bactéries
Dextranes	αD-glucose (1 ⟶ 6) (1)		ramifiée	Bactéries
Glycogène	αD-glucose (1 ⟶ 4) (1)		ramifiée	Bactéries Animaux
Polysaccharides des pectines Galactanes	βD-galactose (1 ⟶ 4)	120		Végétaux
Arabanes	Arabinose			Végétaux
Galacturonanes	Acide αD-galacturonique (1 ⟶ 4)			Végétaux
Polysaccharides des hémicelluloses Xylanes	D-xylose (+ acides uroniques)			Végétaux (Hémicellulose A)
Glucomannanes	Glucose Mannose			Bois (conifères)
Arabino-galactanes	Arabinose Galactose			Bois (conifères)
Arabino-xylanes	Arabinose Xylose			Graminées
Glucuronoxylanes	Ac. glucuronique Xylose			Végétaux (Hémicellulose B)
Polysaccharides des gommes et mucilages	Sucres simples Ac. D-glucuronique			Végétaux
Acides hyaluroniques	N. acétyl glucosamine + acide D-glucuronique (3 ⟶ 4)			Bactéries (Gram. positives principalement) Animaux

TABLEAU I *(suite et fin)*

Polysaccharide	Nature des unités de base et des liaisons	Degré de polymérisation	Chaîne	Provenance
Polysaccharides bactériens complexes	Galactose Glucosamine Galactosamine 2.4-diamino,2.4.6-tridésoxyhexose (2)			Bactéries Gram. positives (*Bacillus subtilis*) ATCC 9945)
Polysaccharides bactériens complexes	Glucose N. acétyl D-glucosamine Glucosamine Rhamnose Fucose (3)			Bactéries Gram. négatives (*Pseudomonas fluorescens*)
Polysaccharides bactériens complexes	Acide galacturonique Glucosamine Galactose Glucose Arabinose Fructose Xylose Ribose Rhamnose Deoxy-ribose (4)			Bactéries Gram. négatives (*Azotobacter Chrococcum*)

(1) Type principal de liaison.
(2) SHARON et JEANLOZ (1959).
(3) MAYAUDON et SIMONART (1966).
(4) VANCURA (1960).

plus tard incorporés au sol avec leurs cadavres. Mais, malgré la variété de la faune du sol, les animaux ne constituent qu'une source mineure de polysaccharides (MEHTA, DUBACH, DEUEL, 1961).

C. — *Polysaccharides provenant des microorganismes*

Les microorganismes représentent, en revanche, une source importante des polysaccharides du sol.

Certes, le poids de polysaccharides présents, à un instant donné, dans la masse vivante des microorganismes est assez faible. En effet, les microorganismes du sol constituent une masse vivante peu importante. D'après les données fournies par POCHON et DE BARJAC (1958), on peut évaluer la masse totale des champignons, actinomycètes et bactéries, dans les conditions optimales de développement de ces organismes, à 3 tonnes environ par hectare, ce qui représente un poids de 600 kg de matière sèche.

Or, les parois cellulaires comptent seulement pour 7 à 20 p. 100 du poids sec des bactéries (SALTON, 1960) et l'on peut admettre un pourcentage pondéral du même ordre pour les champignons et pour les actinomycètes.

Il est possible, avec ces données, de calculer le poids de parois cellulaires des microorganismes vivants du sol; ce poids atteint 42 à 120 kg. Mais les parois cellulaires des microorganismes ne renferment pas uniquement des polysaccharides de sorte que le poids réel des polysaccharides présents à *un instant donné* dans la masse microbienne vivante est encore inférieur à ces valeurs.

Quoi qu'il en soit, ces valeurs apparaissent comme très faibles, comparées à celles que nous avons obtenues en considérant l'apport de polysaccharides fourni par une culture de céréales.

Or, l'analyse des polysaccharides du sol montre que la composition de ces polymères rappelle beaucoup celle des polysaccharides microbiens. Ce point mérite donc d'être discuté mais il convient au préalable, dans ce but, de rappeler sommairement les méthodes employées dans l'étude des polysaccharides du sol.

D. — *Techniques d'analyse des polysaccharides du sol*

L'analyse des polysaccharides du sol a été abordée par deux voies différentes : d'une part l'hydrolyse complète des polysaccharides sans séparation préalable du milieu (technique employée notamment par BRINK, DUBACH et LYNCH (1960), par GRAVELAND et LYNCH (1961), et par ACTON, PAUL et RENNIE (1963), d'autre part l'extraction ménagée de ces polymères à partir du sol avant analyse : telle est la méthode utilisée en particulier par RENNIE, TRUOG et ALLEN (1959) et par SALOMON (1962).

Dans les deux cas, les polysaccharides ou les oses qui en dérivent ont fait l'objet soit d'un dosage global gravimétrique ou colorimétrique, soit de déterminations particulières chromatographiques.

La première voie analytique, par son caractère exhaustif, évite les incertitudes et les imprécisions des techniques d'extraction mais présente un inconvénient manifeste, inhérent à toute méthode globale : elle ne tient pas compte de l'origine et de l'état des sucres dans le sol et confond les polysaccharides de diverses provenances et les sucres libres qui constituent une fraction non négligeable (de 10 à 20 p. 100 selon BACHELIER (1966)) des glucides du sol.

La deuxième technique, en revanche, permet d'isoler du sol des polysaccharides. Dans ce but, plusieurs agents d'extraction ont été employés : l'eau chaude, divers tampons, des solutions alcalines. Une des techniques les plus fréquemment utilisées (RENNIE, TRUOG et ALLEN, 1954 ; LYNCH, 1960 ; MEHTA et *al.*, 1960 ; SALOMON, 1962, etc.) consiste à extraire du sol les matières organiques solubles dans la soude puis à acidifier l'extrait sodique, afin de précipiter les acides humiques, et à séparer du surnageant, par addition d'acétone, les acides fulviques, qui demeurent solubles, des polysaccharides, qui précipitent.

Mais une telle technique réalise seulement une extraction partielle des polysaccharides du sol comme l'ont montré JOHNSTON (1961) et ACTON, PAUL et RENNIE (1963) : une partie seulement des polysaccharides du sol (22,2 à 36,4 p. 100 suivant les milieux, d'après ACTON, PAUL et RENNIE, 1963) est extraite avec les acides fulviques au cours des traitements alcalin et acide successifs ; une fraction, peu importante, demeure liée aux acides humiques tandis que plus de 50 p. 100 de ces polymères demeurent inclus dans les humines.

Mais, ces diverses approches analytiques, malgré leurs limites, permettent d'entrevoir l'importance relative des principales sources de polysaccharides du sol.

E. — *Importance relative des polysaccharides végétaux et des polysaccharides microbiens*

Les diverses données analytiques réunies jusqu'ici suggèrent que les polysaccharides trouvés à un instant donné dans le sol sont, pour une large part, d'origine microbienne. Il en est ainsi en particulier des résultats obtenus par l'analyse de polysaccharides isolés à partir des sols (tabl. 2).

Nous voyons en effet que :

1°. les sucres simples rencontrés sont très nombreux ; cette diversité rappelle celle des polysaccharides bactériens (cf. tabl. 1) ;

2°. la proportion de glucose parmi les divers sucres est faible, comparée à celle de ce sucre dans les polysaccharides des plantes supérieures. Dans les plantes supérieures en effet, la proportion de cellulose est plus importante que celle des hémicelluloses et des pectines et, par conséquent, la proportion de glucose obtenue après hydrolyse dépasse 50 p. 100 de la somme des saccharides.

Mais ces résultats, considérés isolément, ne sauraient suffire à mettre en évidence l'importance

relative des polysaccharides microbiens et des polysaccharides d'origine végétale, puisque l'extraction des polysaccharides est très partielle.

L'analyse globale des aminopolysaccharides du sol (STEVENSON, 1957 ; SOWDEN, 1959) et l'isolement de la cellulose contenue dans divers sols (GUPTA et SOWDEN, 1964) viennent cependant confirmer la place importante des polysaccharides microbiens dans le sol.

STEVENSON (1957) et SOWDEN (1959) ont montré que les aminopolysaccharides, qui proviennent, pour une très large part, des microorganismes, renferment 5 à 25 p. 100 de l'azote total des sols et forment donc une fraction importante (1 à 10 p. 100 environ) de la matière organique.

TABLEAU 2

Caractérisation des préparations de polysaccharides isolés à partir de divers sols
(MEHTA, DUBACH et DEUEL, 1961)

Sucres p. 100 de la somme des sucres dans les préparations	Sol anglais	Sol écossais	Sol indien	Sol organique de New York	Sols minéraux anglais, tourbes et composts
Glucose	20,8	36,0	21,2	27,8-36,4	26,6-38,0
Galactose	20,0		16,6	22,2-22,6	17,8-23,2
Mannose	21,9	29,8	18,5	28,6-29,8	16,3-21,0
Arabinose	11,7		10,4	—	6,8- 8,2
Xylose	23,6	10,3	12,6	—	7,5- 9,0
Ribose	1,5	4,3	trace	—	—
Rhamnose	0	11,0	14,2	7,7-13,6	8,2-19,0
Fucose	0	0,7	0	—	0
Sucres non identifiés	0	7,0	6,5	3,5- 6,6	0

Par ailleurs, d'après GUPTA et SOWDEN (1964), il semble que la cellulose soit à l'origine de 20 à 40 p. 100 seulement du glucose total présent dans les hydrolysats du sol.

Ces diverses observations s'expliquent aisément si l'on envisage la répartition des polysaccharides du sol non plus uniquement d'un point de vue statique mais aussi d'un point de vue dynamique.

III. — ÉVOLUTION DES POLYSACCHARIDES DU SOL

Les proportions relatives dans le sol des polysaccharides d'origine végétale ou microbienne dépendent à la fois des vitesses de synthèse et des vitesses de dégradation de ces polysaccharides.

A. — *Synthèses*

Nous avons indiqué plus haut que les végétaux supérieurs fournissent au sol, *annuellement*, une masse importante de polysaccharides.

A cet apport annuel, à cette « synthèse annuelle », s'opposent les synthèses beaucoup plus rapides dues aux microorganismes. Lorsque les conditions de milieu sont favorables, la population microbienne s'accroît en effet suivant une progression géométrique très rapide, cette population pouvant doubler en quelques heures.

La formation des polysaccharides bactériens s'effectue, pour une large part, « initialement », aux dépens des polysaccharides des végétaux qui, par leur dégradation, fournissent à la fois les matériaux carbonés et l'énergie nécessaire à la synthèse des polysaccharides bactériens.

De nombreux exemples de ce processus ont été observés. La synthèse d'une substance mucilagineuse par les *Cytophaga*, à partir de cellulose, a été prouvée par FAHRAEUS (1944).

La formation de « gommes microbiennes » à partir de polysaccharides ou de substrats riches en polysaccharides a été notée aussi par différents auteurs, notamment par LYNCH (1960) et ACTON, PAUL et RENNIE (1963) dont nous indiquons ci-dessous quelques résultats (tabl. 3 et 4).

TABLEAU 3

Effet de l'addition de pectine sur la production de gommes microbiennes (1) *après 2 semaines d'incubation*
(LYNCH, 1960)

Traitement	Gommes en kg/ha	
	Sol cultivé	Sol forestier
Témoins	480	1 120
Avec pectine (2)	5 700	4 980

(1) Extraites par la méthode de RENNIE, TRUOG et ALLEN (1954).
(2) 2 p. 100 du poids de sol.

TABLEAU 4

Effet du traitement du sol et de la période d'incubation sur la teneur en gommes (1) *d'un sol de Trossachs*
(g/100 g de sol)
(ACTON, PAUL et RENNIE, 1963)

Traitement	Durée d'incubation (en semaines)					
	1	2	3	4	5	6
Témoin	0,20	0,17	0,18	0,21	0,17	0,21
Avec paille (2)	0,31	0,24	0,21	0,21	0,21	0,26

(1) Extraites par la méthode de RENNIE, TRUOG et ALLEN (1954).
(2) 2 p. 100 du poids du sol.

Ces données montrent la rapidité de la synthèse microbienne. Cette synthèse paraît cependant rapidement compensée par des phénomènes de dégradation.

B. — *Dégradation*

L'étude de la dégradation des polysaccharides d'origine végétale a été abordée suivant 3 voies principales.

1. *Dégradation des polysaccharides* in situ (*dans le végétal*), *sans incorporation au sol.*

La fermentation de très nombreux végétaux a été étudiée.

Les effets de l'incubation ont été contrôlés :

— soit par analyse immédiate des principaux constituants du végétal (cellulose, hémicellulose, substances solubles, lignine ...) ;

— soit par étude histologique des tissus en voie d'humification.

Ces travaux ont permis de montrer que la vitesse de dégradation des polysaccharides varie dans l'ordre décroissant suivant : amidon, pectine, mannanes, xylanes et cellulose, ce qu'illustrent les résultats suivants (fig. 1).

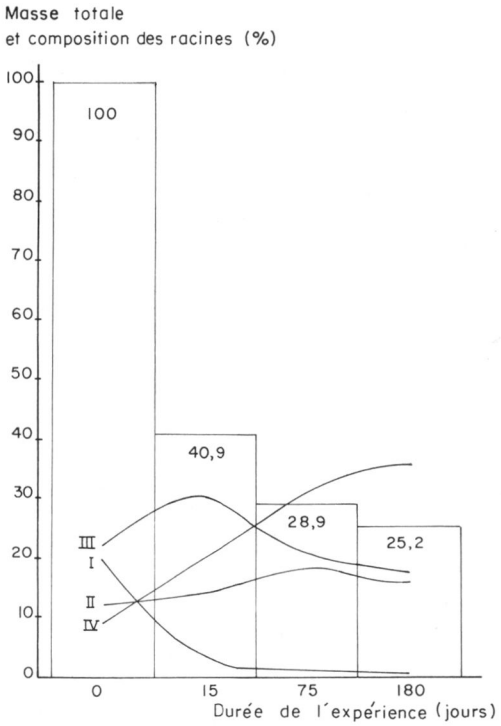


FIG. 1. — *Modification de la composition chimique de racines de luzerne au cours de l'humification* (KONONOVA, 1961, p. 139)
(I amidon ; II hémicelluloses ; III cellulose : IV lignine)

L'étude anatomique des tissus en voie d'humification a par ailleurs permis d'observer la disparition rapide des tissus cellulosiques tandis que subsistent plus longtemps, peu altérés, les tissus lignifiés (KONONOVA, 1961).

Ces techniques présentent l'avantage de permettre une analyse facile, à tout instant, des produits restants ou des produits formés au cours de la fermentation. Ils présentent en revanche l'inconvénient de ne pas intégrer dans les phénomènes l'influence propre du sol, notamment l'influence de son pouvoir absorbant et de son pouvoir tampon.

2. *Dégradation de polysaccharides ajoutés au sol.*

Des études récentes ont été réalisées dans ce domaine. Afin d'éviter les difficultés qui résident dans la détermination de la masse de polysaccharides non décomposés, demeurant dans le sol, les

auteurs ont utilisé, soit des feuilles de polysaccharide (cellulose) dont ils ont pu suivre la dégradation par une observation microscopique ou macroscopique, soit des polysaccharides marqués au ^{14}C.

L'incorporation de cellulose dans le sol a permis de mesurer la vitesse de dégradation de ce polymère et l'intervention de Collemboles (*Folsomia candida*) dans ce processus (TORNE, 1965), l'influence des conditions de sol (humidité principalement) et le rôle important des Fusarium, champignons qui sont parmi les agents les plus rapides de dégradation de la cellulose (WENT et DE JONG, 1966).

L'emploi de cellulose marquée a permis de suivre l'évolution et le sort du carbone de la cellulose ajoutée au sol (SÖRENSEN, 1963). L'évolution de ce polysaccharide a été comparée à celle du glucose (tabl. 5).

TABLEAU 5

Décomposition comparée de cellulose ^{14}C et de glucose ^{14}C incorporés au sol

Durée d'incubation (jours)	Pourcentage de Carbone libéré sour forme de CO_2	
	Cellulose	Glucose
5	6	37
20	33	60
160	62	69

On voit (tabl. 5) que la dégradation de la cellulose est moins rapide que celle du glucose, en début d'incubation ; cependant, après 160 jours, la proportion du carbone libéré sous forme minérale est à peu près la même.

Ces travaux ne nous fournissent que des données relatives et contingentes sur la vitesse d'évolution de la cellulose dans le sol : la cellulose introduite dans le sol sous forme de feuilles a subi, au cours de sa préparation, des traitements qui ont modifié sa structure ; la cellulose ^{14}C, préalablement extraite d'un végétal, attaquée à l'état isolé, est dégradée dans des conditions un peu différentes de celle de la cellulose incluse dans les tissus végétaux.

Les polysaccharides peuvent en effet être protégés contre la dégradation, dans le végétal, par la lignine, et dans le sol, par les substances humiques et les argiles (LYNCH et COTNOIR, 1956).

Quoiqu'il en soit, la dégradation dans le sol des polysaccharides d'origine végétale apparaît comme un phénomène généralement rapide.

Il en est un peu différemment des polysaccharides d'origine microbienne. Ces polymères se décomposent moins rapidement que les polysaccharides des plantes (MARTIN, 1946 ; WHISTLER et KIRBY, 1956).

La stabilité relative des polysaccharides d'origine microbienne apparaît aussi dans les observations de MAYAUDON et SIMONART (1966). Ces auteurs ont incorporé dans un sol un complexe lipoprotéine-polysaccharide (LPP), marqué au ^{14}C, constituant majeur des parois cellulaires du *Pseudomonas fluorescens*. Ils ont observé qu'après 100 jours d'incubation, 45 p. 100 du ^{14}C introduit a été minéralisé mais ils ont retrouvé, irréversiblement agrégés aux acides humiques, tous les monosaccharides de la copule polysaccharidique originelle, à l'exception du fucose qui a disparu.

Il semble donc que la rétention du polysaccharide par les acides humiques soit à l'origine de la stabilité relative de ces polysaccharides microbiens.

D'autres mécanismes, tels des empêchements stériques, pourraient aussi expliquer la stabilité supérieure des polysaccharides microbiens, comparée à celle des polysaccharides végétaux.

Les agrégats de sol contiennent beaucoup de micropores (de diamètre inférieur à 1 μ) qui sont inaccessibles aux microorganismes (ROVIRA et GRAECEN, 1958) ; des polysaccharides situés dans de tels pores pourraient être relativement à l'abri de la dégradation. Les polysaccharides extracellu-

laires microbiens ont une probabilité supérieure à celle des polysaccharides des végétaux de pénétrer dans de tels pores (MEHTA, DUBACH et DEUEL, 1961).

Ces divers phénomènes peuvent contribuer à expliquer la place prépondérante et le rôle important des polysaccharides microbiens dans le sol.

IV. — RÔLE DES POLYSACCHARIDES

Les polysaccharides jouent dans les sols des rôles très divers.

En raison de cette diversité, nous classerons ces rôles en fonctions statiques (nous entendons par là celles qui sont directement liées aux propriétés de leur molécule, considérée comme constituant stable du sol) et en fonctions dynamiques (il s'agit ici des fonctions dans lesquelles ces polymères interviennent par leur dégradation).

Nous envisagerons à part, parce qu'il peut être considéré à la fois sous ces deux aspects, leur rôle dans les processus d'humification.

A. — *Les fonctions statiques des polysaccharides*

Les molécules de polysaccharides interviennent dans les phénomènes d'agrégation des particules du sol. Elles participent aussi au métabolisme de certains cations, par la formation de complexes organo-métalliques.

1. *Action sur l'agrégation des particules du sol.*

L'effet favorable des polysaccharides sur l'agrégation des particules du sol, et donc sur la stabilité de la structure, a fait l'objet de très nombreuses observations.

TABLEAU 6

Influence de la paille sur le niveau d'agrégation d'un sol de Trossachs
(ACTON, PAUL et RENNIE, 1963)

Traitement su sol	Pourcentage d'agrégats de diamètre supérieur à 0,5 mm stables à l'eau après les périodes d'incubation indiquées (semaines)						
	1	2	3	4	5	6	Moyennes
Témoins	7,4	6,3	7,1	6,9	7,5	7,2	7,1
Avec paille	14,0	11,9	8,5	10,4	10,4	10,4	11,4

Ainsi par exemple, RENNIE, TRUOG et ALLEN (1954), par addition au sol de polysaccharides bactériens, ACTON, PAUL et RENNIE (1963), par addition de paille, génératrice de tels polysaccharides (cf. tabl 4), ont observé une augmentation rapide et importante du nombre d'agrégats stables de différents diamètres. Nous avons réuni dans le tableau ci-dessus quelques résultats dus à ces auteurs.

L'action favorable des polysaccharides sur la stabilité de la structure a été prouvée par d'autres expériences directes, complémentaires des précédentes.

CLAPP et EMERSON (1965), ainsi que plusieurs autres auteurs, ont pu provoquer une perte de stabilité des agrégats naturels par traitement de ces derniers au periodate dilué, qui oxyde les polysaccharides mais a peu d'effet sur les autres éléments du sol.

Différents auteurs ont aussi réuni des observations qui corroborent ces faits, grâce à l'étude des relations entre l'agrégation des sols et leur teneur en polysaccharides.

Ainsi, TOOGOOD et LYNCH (1959), étudiant les sols diversement exploités d'un même champ d'essai, ont obtenu une relation définie entre la teneur en polysaccharides totaux et le diamètre moyen des agrégats. ACTON, RENNIE et PAUL (1963) notent aussi des coefficients de corrélation significatifs, mais peu élevés, entre le pourcentage d'agrégats et la proportion de « gommes » extraites du sol et séparées des acides fulviques. Mais, fait important, des corrélations positives plus élevées sont observées par ces auteurs entre le pourcentage d'agrégats stables et la teneur du sol en polysaccharides inclus dans la fraction acide humique-humine ou inclus dans la fraction fulvique.

Il convient toutefois de signaler que plusieurs auteurs n'ont pas observé d'effet favorable des polysaccharides sur la structure. HALSTEAD (1954) n'a pas observé de relations, dans divers limons sableux, entre le pourcentage d'agrégats stables de diamètre supérieur à 0,1 mm et la teneur en « gommes » extractibles de la fraction fulvique. SALOMON (1962) et WEBER (1965) n'ont pas non plus trouvé de relation entre ces deux grandeurs.

MEHTA et *al.* (1960), GREENLAND, LINDSTROMG et QUIRK (1962), n'ont pu observer de diminution de stabilité par traitement au périodate de sols bruns et de rendzines.

Les désaccords avec les résultats précédents pourraient provenir, dans le premier cas, du rôle peu important des « gommes » extractibles comparé à celui des polysaccharides demeurant liés aux acides humiques et à l'humine (ACTON, RENNIE et PAUL, 1963), dans le deuxième cas, d'un phénomène de protection physique des polysaccharides par le calcaire, par enrobage des particules.

Il se peut aussi que, dans les milieux étudiés par ces auteurs, le rôle des polysaccharides soit moins important que dans les sols acides à structure moins stable. Mais ces observations ne sauraient en aucune façon prouver l'inefficacité des polysaccharides dans la stabilisation de la structure. Celle-ci dépend en effet beaucoup de la texture du sol, et les expériences relatées ci-dessus ne constituent guère que des approches de ce problème.

Après avoir rapporté les principaux faits relatifs à l'action des polysaccharides sur l'agrégation des particules, nous allons néanmoins essayer d'en dégager les mécanismes.

Discussion : mode d'action des polysaccharides.

L'action des polysaccharides dépend des propriétés particulières de leur molécule et des propriétés de surface des autres constituants du sol. Les polysaccharides se fixent sur les colloïdes du sol.

a) *Propriétés des molécules des polysaccharides.*

Parmi les caractères des polysaccharides, qui jouent un rôle dans l'agrégation des particules du sol, figure en premier lieu la longueur des chaînes carbonées de leur molécule.

Il est possible d'évaluer cette longueur. Pour une molécule de cellulose fibreuse comprenant 3 000 monomères, elle serait :

$$5{,}15\ A_0 \times 3\,000 = 15\,450\ A_0 \text{ soit environ } 1{,}5\ \mu$$

Pour un polysaccharide extrait du sol et dont le poids moléculaire « apparent » est de 48 000 (FINCH, HAYES et STACEY, 1966) elle serait, en supposant à la fois que la molécule est étirée et linéaire,

$$\frac{5{,}15\ A_0 \times 48\,000}{147} = 1\,681\ A_0 \text{ soit } 0{,}17\ \mu \text{ environ}$$

(147 étant le poids « moléculaire » moyen d'une unité monomère)

Les longueurs obtenues, quoique différentes, sont, dans l'un et l'autre cas, très grandes. Il en est de même de la « surface » des molécules.

De plus, ces longues chaînes sont flexibles, comme l'ont prouvé des mesures de viscosité (BARKER, FINCH, HAYES et *al.*, 1964).

En outre, les polysaccharides, étant fortement polymérisés, possèdent un nombre considérable de groupements fonctionnels (groupes hydroxyles principalement mais aussi, pour certains, groupes carboxyles).

Ces divers caractères structuraux confèrent aux polysaccharides de remarquables propriétés adhésives.

b) *Propriétés de surface des colloïdes minéraux des sols.*

Les polysaccharides se trouvent placés dans le sol au contact d'un milieu très dispersé, dans lequel les colloïdes minéraux, les argiles notamment, tiennent une grande place. Or, les argiles, du fait de leurs très petites dimensions (inférieures à 2 μ) sont des particules dont la surface par unité de poids est considérable (la surface externe d'une montmorillonite est de l'ordre de 50 à 100 m^2 par gramme ; la surface interne, de 700 m^2 environ).

Ces surfaces possèdent une charge électrostatique négative.

c) *Adsorption des polysaccharides.*

Les polysaccharides se fixeraient sur ces couches négativement chargées par des liaisons hydrogène et par des forces de van der Waals.

Cette adsorption a été étudiée, à partir de polysaccharides bactériens, par FINCH, HAYES et STACEY (1966) qui ont montré que la densité de charge des polysaccharides bactériens et la nature des cations saturant les argiles ont une grande influence sur ce phénomène (fig. 2).

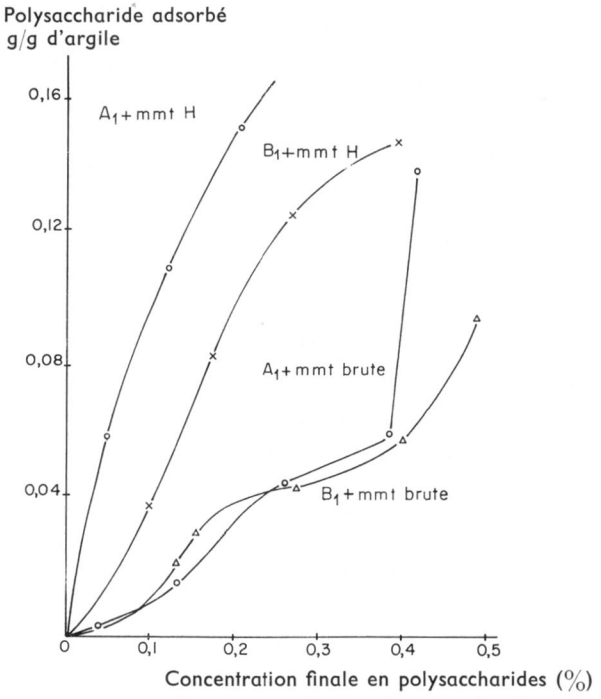


FIG. 2. — *Adsorption de deux polysaccharides* (extraits d'un sol) *par la montmorillonite brute et par la montmorillonite H*

Les polysaccharides adsorbés par les colloïdes minéraux du sol sont très énergiquement retenus. Ceci est vrai, non seulement des polysaccharides possédant des fonctions carboxyles, mais aussi des polysaccharides neutres.

Cela s'explique, en l'absence de liaisons très énergiques, par le nombre très élevé des liaisons particulières contractées par le polysaccharide : il existe en effet une probabilité faible pour que toutes les liaisons établies entre le polysaccharide et le colloïde minéral soient rompues simultanément (GREENLAND, 1965).

d) *Action sur la dispersion, la mouillabilité et la cohésion des agrégats.*

D'après la théorie de HÉNIN (1938, 1960), la condition de stabilité à l'eau des agrégats est $C - 2 T_2 \cos\alpha/r > 0$ où C représente la cohésion de l'agrégat, T_2 la tension superficielle de l'eau, r le rayon des pores de l'agrégat, α l'angle de raccordement du ménisque de l'eau dans les pores de l'agrégat. Le second terme de la différence représente la pression capillaire de l'eau dans les agrégats.

Les polysaccharides contribuent à augmenter la cohésion des agrégats en formant des ponts entre les particules. Un tel processus expliquerait l'effet favorable des dextranes et des carboxyméthyl-celluloses sur la stabilisation des agrégats de sol (GREENLAND, 1963).

Les polysaccharides agissent aussi sur le second terme de l'inégalité de HÉNIN (1938). MONNIER (1965) a montré que l'adsorption de carboxyméthyl-cellulose augmente la mouillabilité de l'agrégat. Cette action défavorable est largement compensée par l'augmentation de la cohésion.

Par contre, l'addition au sol de substances fermentescibles, qui déclenchent une prolifération microbienne active (nécessairement génératrice de polysaccharides), agit sur la stabilité des agrégats en diminuant leur mouillabilité (MONNIER, 1965).

2. *Complexage des ions minéraux.*

MARTIN, ERVIN et SHEPERD (1966) ont montré, *in vitro*, que les polysaccharides d'origine bactérienne forment des « complexes » avec divers cations minéraux (Fe, Al, Cu, Zn) : un précipité organo-métallique est obtenu en ajoutant une solution de sel de fer à une solution aqueuse de polysaccharide. Des précipités analogues sont aussi obtenus avec des sels d'aluminium, de cuivre et de zinc quand les mélanges sont agités en présence d'alcool.

De son côté, SAINI (1966) a également noté la formation d'un complexe entre un polysaccharide extrait du sol et l'aluminium ou le fer. La formation du complexe est mise en évidence par l'abaissement de pH observé lors du mélange de la solution organique et de la solution minérale et par étude des modifications du spectre d'absorption du polysaccharide. Le complexe Fe-polysaccharide est plus stable que le complexe Al-polysaccharide.

La présence, dans le sol, de tels polysaccharides a été établie par les travaux de FLORJANCZYK (1965). Cet auteur a pu isoler, à partir d'acides fulviques extraits d'un sol, un complexe Fe-polysaccharide et un complexe Al-polysaccharide. L'apport d'amendements organiques accroît la formation de complexe Fe-polysaccharide.

La formation de tels complexes a probablement des répercussions importantes sur la dynamique de ces cations (et, par conséquent, sur la pédogenèse) mais aussi sur la nutrition des plantes et sur la stabilité de la structure. La mobilité du fer et de l'aluminium dans les profils, la solubilité du phosphore, qui peut former, avec des cations, des phosphates insolubles, la cohésion des agrégats, doivent nécessairement dépendre de la formation de ces complexes organométalliques.

Il n'existe pas à l'heure actuelle, à notre connaissance, de travaux qui permettent de préciser le rôle exact des polysaccharides dans ces divers phénomènes et il n'est pas possible d'estimer à partir des travaux relatifs à la matière organique du sol considérée globalement la part du rôle des polysaccharides. En effet, le rôle des polysaccharides dans les phénomènes de complexage des cations n'est pas spécifique, ainsi que l'a montré MORTENSEN (1963).

B. — *Les fonctions dynamiques des polysaccharides*

Les polysaccharides font partie des composés organiques les moins stables du sol. Par leur dégradation, ils contribuent à alimenter l'activité microbienne.

Composés ternaires, leur décomposition a diverses incidences sur le métabolisme de l'azote.

1. *Action sur l'activité microbienne.*

Les polysaccharides, particulièrement ceux qui proviennent de végétaux frais, sont des sources de carbone et d'énergie rapidement et facilement utilisables par les microorganismes ; de ce fait, les polysaccharides contrôlent, dans une large mesure, l'activité microbienne. Ainsi, ils interviennent, indirectement, sur plusieurs phases du métabolisme de l'azote dans le sol.

2. *Influence sur le métabolisme de l'azote.*

La fixation non symbiotique de l'azote atmosphérique est principalement l'œuvre, en milieu aérobie, de bactéries du genre *Azotobacter*, en milieu anaérobie de bactéries du genre *Clostridium*.

Ces bactéries sont des organotrophes : elles ont besoin d'une substance organique comme source d'énergie ; cette substance fournit en même temps le carbone nécessaire pour les synthèses protoplasmiques. Certes, ni la cellulose, ni les hémicelluloses ne sont directement attaquées par les *Azotobacter*. Mais les *Azotobacter* assimilent les produits de la décomposition partielle de la cellulose. Tel est le cas des produits fournis lors de l'attaque de ce polymère par les *Cytophaga*. Aussi, POCHON et TCHAN (1950) ont-ils pu réaliser, au laboratoire, la symbiose artificielle de ces deux genres bactériens.

La décomposition des polysaccharides a une autre incidence importante sur le métabolisme de l'azote : cette décomposition s'accompagne, évidemment, d'une consommation d'azote par les microorganismes pour leurs synthèses cellulaires.

En moyenne, le rapport du polysaccharide consommé à l'azote utilisé est de 30/1 (POCHON et DE BARJAC, 1958).

L'addition au sol d'un matériel végétal riche en polysaccharides et pauvre en azote, comme la paille (rapport $\frac{\text{polysaccharide}}{\text{azote}} > 30$), provoque l'utilisation, par les microorganismes, de l'azote assimilable du sol au détriment, évidemment, de la végétation.

C. — *Rôle des polysaccharides dans les processus d'humification*

Les polysaccharides participent-ils à la formation des substances humiques ? Dans quelles conditions ?

Rappelons sommairement tout d'abord ce que l'on entend par substances humiques. Selon l'opinion de KONONOVA (1961), il s'agit de « substances qui, en raison de leur nature particulière, ne peuvent pas être rattachées à des groupes existant de substances de la chimie organique. La nature, l'origine et les propriétés de ces substances ne sont pas encore bien connues. »

Cette définition, essentiellement négative, se trouve heureusement complétée, dans la suite de l'ouvrage de cet auteur, par les résultats que fournit l'étude de la structure et des propriétés d'une fraction de ces substances, les acides humiques. Cette fraction peut être considérée, avec quelque approximation il est vrai, comme représentative de la masse des substances humiques.

Les substances humiques seraient formées de macromolécules, d'hétéropolycondensats constitués de noyaux aromatiques et de composés azotés en forme cyclique et en forme de chaînes périphériques.

Les analyses d'acides humiques mettent aussi en évidence la présence d'oses, de substances réductrices. Existe-t-il aussi des oses dans la molécule d'acide humique ou s'agit-il là de substances contaminantes ?

Une grande partie, si ce n'est la totalité, des polysaccharides de l'humus constituent des impuretés des préparations d'acides humiques. Les polysaccharides, par leurs « propriétés adhésives », peuvent former avec les substances humiques des coacervats stables, comme le suggèrent les résultats de MAYAUDON et SIMONART (1966). Mais certains résultats montrent qu'il est possible par des techniques de purification, de réduire considérablement le taux des substances réductrices (principalement formées de polysaccharides) présentes dans les préparations humiques. Tandis que DRAGUNOV (1948) a observé la présence d'un taux élevé de substances réductrices (11 p. 100) dans un acide humique extrait de chernozem et non purifié après hydrolyse, BEL'CHIKOVA (1951) a noté un taux beaucoup plus faible (3,3 p. 100) dans un acide humique de même origine mais purifié, après hydrolyse, par l'acétate de plomb et la baryte. De même, dans une préparation d'acides fulviques, fraction humique soluble en milieu acide, ROULET, MEHTA, DUBACH et *al.* (1964) sont parvenus à réduire le taux de polysaccharides de 25 à 5 p. 100 par filtration de ces substances au moyen d'un gel Sephadex G 75.

Il est probable que les progrès réalisés sans cesse dans le domaine de la chromatographie permettront d'obtenir bientôt, à partir des acides humiques, des purifications comparables.

L'imprécision des caractères qui définissent les substances humiques a fait longtemps considérer comme telles des matières brunes synthétisées à partir des polysaccharides (considérés par conséquent comme source directe de substances humiques).

Ainsi, vers le milieu du XIXe siècle, MULDER proposait, pour la synthèse de l'acide humique, le schéma suivant :

$$\text{Cellulose} \xrightarrow[-H_2O]{+O_2} \text{Acide ulmique} \xrightarrow[-H_2O]{+O_2} \text{Acide humique}$$

Ce schéma ne tenait pas compte de la présence constante d'azote dans les acides humiques. La conception de MAILLARD (1916) répondait, en revanche, à cette objection.

MAILLARD, d'après les résultats de ces expériences, pensait que les substances humiques prennent naissance par combinaison de sucres et d'acides aminés.

Il semble beaucoup plus probable que les polysaccharides interviennent d'une manière indirecte, par l'intermédiaire de diverses actions microbiennes. C'est ce que tendent à prouver les expériences de KONONOVA (1961).

KONONOVA a fait décomposer de la cellulose par une myxobactérie, *Sorangium cellulosum*, espèce qui peut dégrader, outre la cellulose, divers autres polysaccharides ainsi que de très nombreux monosaccharides.

Cet auteur observe les principaux faits suivants :

1. une fraction du carbone de la cellulose (un quart environ) participe à la construction de substances issues du métabolisme de la myxobactérie ;

2. la myxobactérie synthétise de la peroxydase et de la polyphénoloxydase ;

3. ces enzymes, mis en présence de pyrogallol, d'eau oxygénée et de plasma myxobactérien (qui renferme 75 p. 100 de protéines) provoquent la condensation du phénol et des protéines. Le produit formé, de teinte brune, est, comme les acides humiques, soluble dans les solutions alcalines et insoluble en milieu acide.

Il convient de noter que cette « synthèse humique » a nécessité l'apport d'un produit qui n'est pas issu du métabolisme de la myxobactérie, le pyrogallol, composé aromatique.

Mais divers travaux ont montré que certains champignons, à partir d'un milieu renfermant des monosaccharides, font la synthèse de substances aromatiques (KONONOVA, 1961).

Il est ainsi prouvé qu'à partir des polysaccharides peuvent prendre naissance toutes les structures nécessaires à l'édification des substances humiques.

V. — CONCLUSIONS

Un dixième environ de la matière organique du sol est sous forme de polysaccharides. Ces polymères proviennent, pour une large part, de synthèses microbiennes réalisées au dépens des polysaccharides des végétaux.

Les polysaccharides jouent dans le sol divers rôles très importants.

— Ils concourent largement à la stabilité structurale.

— Par leur faculté de complexer certains cations minéraux (Fe, Al, etc.), ils modifient la dynamique de ces cations (lessivage, insolubilisation).

— Par leur dégradation, ils contrôlent, dans une large mesure, l'activité microbienne et notamment le phénomène de fixation non symbiotique de l'azote.

— Ils participent aussi, indirectement, aux processus d'humification.

Si l'on connaît donc aujourd'hui, dans leurs linéaments généraux, l'origine, l'évolution et le rôle des polysaccharides du sol, bien des points concernant la structure, les propriétés et les fonctions de ces substances demeurent encore obscurs, hypothétiques.

Les « vides » du tableau 1 donnent la mesure de notre ignorance en ce qui concerne la nature chimique des polysaccharides. La structure des polysaccharides microbiens est, dans l'ensemble, moins bien connue que celle de leurs homologues des végétaux supérieurs. Il en résulte que la contribution dominante des polysaccharides microbiens aux diverses propriétés et à la vie du sol est, pour les chercheurs, une source de difficultés particulièrement grandes : la membrane microbienne est de nature complexe et une inévitable variété structurale accompagne la diversité de la population microbienne du sol.

Or, de la connaissance des structures moléculaires dépend notre compréhension du rôle des polysaccharides dans la stabilisation des agrégats, dans le complexage des ions minéraux et dans l'humification.

En raison de la complexité de ces substances et de leurs multiples fonctions dans le sol (fonctions qui concernent à la fois la nutrition des plantes, la vie microbienne et la pédogenèse), les polysaccharides doivent bénéficier d'études conjuguées de la part des biochimistes, des microbiologistes, des physico-chimistes et des pédologues ; c'est là une condition nécessaire pour faire avancer rapidement nos connaissances dans ce domaine.

Reçu pour publication en janvier 1968.

SUMMARY

POLYSACCHARIDES OF THE SOIL : ORIGIN, DYNAMICS AND ROLE

One tenth of the organic matter in soil consists of polysaccharides.

These polymers are synthesized in the soil by animals (instanced by chitin, mucopolysaccharides ...), by plants (cellulose, hemicelluloses, pectins ...), and micro-organisms (polysaccharides of cell walls), the greater portion being supplied by plants and micro-organisms.

The rate of synthesizing and of destroying of soil polysaccharides depends on their origin : while polysaccharides of the higher plants are synthesized slowly but deteriorate swiftly, those of microbial origin are built up faster and development of the latter takes longer.

Polysaccharides have a part, in the soil, with many physical, chemical and biological phenomena. They promote aggregation of mineral particles and stabilize the structure. In conjunction with various mineral cations (Fe, Al, Cu, Zn) they bring about complexes, thus altering their dynamibalance in the soil. Polysaccharides, which are the chief source of carbon and energy for microorganisms, govern, owing to their destruction, the microbial activity, especially fixation of atmospheric nitrogen and humification of the soil nitrogen.

Polysaccharides play an important role on the generation of humic matter by supplying the carbon and energy needed for building up the materials needed for the synthesis. Being invariably components of humic acids, the greater part of these polysaccharides are fixed to the « humic molecule » by coacervation.

ZUSAMMENFASSUNG

DIE POLYSACCHARIDEN DES BODENS : URSPRUNG, ENTWICKLUNG UND BEDEUTUNG

Die Polysaccharide bilden ungefähr ein Zehntel der organischen Bodenbestandteile.

Diese Polymeren werden im Boden durch Tiere (Chitin, Schleimpolysaccharide, usw.) durch Pflanzen (Zellulose, Hemizellulosen, Pektine, usw.), sowie durch Mikroorganismen (Polysaccharide der Zellwände) synthetisiert. Die Pflanzen und die Mikroorganismen stellen die zwei wichtigsten Quellen dar.

Der Synthese- und Abbaurhythmus der Bodenpolysaccharide ist je nach dem Ursprung verschieden : der massiven, jährlichen Synthese der Polysaccharide der höheren der Pflanzenarten und dem raschen Zerfall dieser Zusammensetzungen, stehen die schnellere Synthese und die langsamere Entwicklung den Bakterien-polysaccharide gegenüber.

Die Polysaccharide greifen im Boden in zahlreiche physikalische, chemische und biologische Phänomene ein. Sie begünstigen die Anhäufung der mineralteilchen und erhöhen die Stabilität der Bodenstruktur. Sie bilden Komplexe mit verschiedenen mineralkationen (Fe, Al, Cu, Zn) und verändern so ihre Dynamik im Boden. Durch ihren Abbau kontrollieren die Polysaccharide als

Kohlenstoff- und Energiequelle, die Bakterientätigkeit, namentlich die Bindung des atmosphärischen Stickstoffes und die Neugestaltung des Bodenstickstoffes.

Die Polysaccharide beteiligen sich an der Herstellung der humushaltigen Materie, indem sie den Kohlenstoff und die notwendige Energie zur Herstellung der zu dieser Synthese verwendeten Stoffe liefern. Als konstante Bestandteile der Huminsäuren sind sie, meistenteils, durch Koalicervierung mit dem « humushaltigen Molekül » gebunden.

РЕЗЮМЕ

Полисахариды почвы, их происхождение, эволюция и роль.

Ж. ДЭКО.

Полисахариды представляют приблизительно десятую часть органического вещества почвы. Эти полимеры синтетизируются в почве животными (например хитин мукополисахариды...), растениями (целлулоза, хемицеллулоза, пектины...) и микроорганизмами (полисахариды клеточных стенок и т. д.). Растительность и микрофлора являются двумя их главными источниками.

Ритм синтеза и деградации почвенных полисахаридов различен, в зависимости от их происхождения : массивный годичный синтез полисахаридов и быстрая деградация этих соединений в случае их растительного происхождения, или ускоренный синтез и замедленная эволюция полисахаридов происхождения микробиального.

Полисахариды участвуют в почве во многих явлениях физического, химического, и биологического характеров. Они способствуют агрегации минеральных частичек и увеличивают прочность структуры; составляют комплексы с различными минеральными катионами (Fe, Al, Cu, Zn) изменяя таким образом их динамику в почве. Являясь источником углерода и энергии, полисахариды, благодаря своей деградации контролируют микробиальную активность и в частности фиксацию атмосферного и реорганизацию почвенного азота.

Полисахариды принимают также участие в выработке гуминовых комплексов, поставляя углерод и энергию необходимые для создания веществ участвующих в этом синтезе. Являясь постоянной составной частью гуминовых кислот полисахариды прикреплены в большинстве случаев к « гуминовой молекуле ».

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ACTON C. J., PAUL E. A., RENNIE D. A., 1963. Measurement of the polysaccharide content of soils. *Canad. J. Soil Sci.*, **43**, 141-150.

BACHELIER G., 1966. Les sucres dans le sol et leur dosage global. *Cah. O. R. S. T. O. M. Ser. Pedol.*, **4**,1, 9-22.

BARKER S. A., FINCH P., HAYES M. H. B., 1964. Isolation and preliminary characterization of soil polysaccharides. *Nature*, London, **205**, 68-69.

BEL'CHIKOVA N. B., 1951. Some regularities in the content and composition of humus and in the properties of humic substances in the main soil groups of U. S. S. R. Trudy pochv. *Inst. Akad. Nauk. S. S. S. R.*, **38**.

BRINK R. H., DUBACH Jr P., LYNCH D. L., 1960. Measurement of carbohydrates in soil hydrolyzates with anthrone. *Soil Sci.*, **89**, 3, 157-166.

CLAPP C. E., EMERSON W. W., 1965. The effect of periodate oxidation on the strength of soil crumbs. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **29**, 127-134.

DRAGUNOV S. S., 1948. A comparative study of humic acids from soils and peats. *Pochvovednie*, **7**.

FAHRAEUS G., 1944. Aerobic cellulose decomposition. I. The course of cellulose decomposition by Cytophaga. *Lantbruks-Högskol. Ann.*, **12**, 1-22.

FINCH P., HAYES M. H. B., STACEY M., 1966. Studies on soil polysaccharides and on their interaction with clay preparations. *Soil Chem. Fert. internation. Soc. Soil Sci.* Aberdeen, **2** et **4**, 19-32.

FLORJANCZYCK S., 1965. Separation of fulvic acids on strongly basic anion exchanger. I. Ferric glycose compounds. II. Aluminium in the fulvic acid fraction. III. Fulvic acids from black earth and from podzol. *Roezniki glebozn.*, **15**, 409-440.

GRAVELAND D. N., LYNCH D. L., 1961. Distribution of uronides and polysaccharides in the profiles of a soil catena. *Soil Sci.*, **91**, 3, 162-165.

GREENLAND D. J., LINDSTROMG R., QUIRK J. P., 1962. Organic materials which stabilize natural soil aggregates. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **26**, 366-371.

GREENLAND D. J., 1965. Interaction between clays and organic compounds in soils. Part II. Adsorption of soil organic compounds and its effect on soil properties. *Soils Fertil.*, **28**, 6, 521-532.

GUPTA U. C., SOWDEN F. J., 1964. Isolation and characterization of cellulose from soil organic matter. *Soil Sci.*, **97**, 5, 328-333

HALSTEAD R. L., 1954. *Soil aggregation as influenced by microbial gums, type of crop, lime and fertilizers* Ph D. Thesis, Univ. of Wisconsin.

HÉNIN S., 1938. *Etude physicochimique de la stabilité structurale des terres.* Thèse, Paris.

HÉNIN S., 1960. *Le profil cultural.* Éd. S. E. I. A.

HORTON D., WOLFROM M. L., 1963. *Polysaccharides. Comprehensive biochemistry.* Vol 5, *Carbohydrates*, **7**, 185-231, ed. Florkin and Stotz.

JOHNSTON H. H., 1961. Common sugars found in soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **25**, 5, 415.

KONONOVA M. M., 1961. *Soil organic matter.* Pergamon Press.

LYNCH D. L., COTNOIR L. J., 1956. The influence of clay minerals on the breakdown of certain organic substrates. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **20**, 367-370.

LYNCH D. L., 1960. The effect of rose bengal on polysaccharide production in soils. *Canad. J. Microbiol.*, **6**, 673-674.

MAILLARD L. C., 1916. Synthèse des matières humiques par action des acides aminés sur les sucres réducteurs. *Ann. Chim. Phys.*, **5**, 258-317.

MARTIN J. P., 1946. Microorganisms and soil aggregation II. Influence of bacterial polysaccharides on soil structure. *Soil Sci.*, **61**, 157-166.

MARTIN J. P., ERVIN J. O., SHEPERD R. A., 1966. Decomposition of the iron, aluminium, zinc and copper salts or complexes of some microbial and plant polysaccharides in soil. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **30**, 196-200.

MAYAUDON J., SIMONART P., 1966. Humification dans le sol d'un complexe polysaccharique ^{14}C d'origine microbienne. *Meded. Landbouw Gent*, **30**, 941-955.

MEHTA N. C., STREULI H., MÜLLER M., DEUEL H., 1960. Role of polysaccharides in soil aggregation. *J. Sci. Food Agric.*, **11**, 40-46.

MEHTA N. C., DUBACH P., DEUEL H., 1961. Carbohydrates in the soil. *Adv. Carbohydrates Chem.*, **16**, 335-355.

MONNIER G., 1965. *Action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols.* Thèse, Paris.

MORTENSEN J. L., 1963. Complexing of metals by soil organic matter. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **27**, 179-186.

POCHON J., BARJAC H. de, 1958. *Traité de microbiologie du Sol*, p. 547, éd. Dunod.

POCHON J., TCHAN Y. T., 1950. *Rev. gén. Botan.*, **57**, 257 d'après POCHON et DE BARJAC, 1958, p. 531.

RENNIE D. A., TRUOG E., ALLEN O. N., 1954. Soil aggregation as influences by microbial gums, level of fertility and kind of crop. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **18**, 399-403.

ROULET N., MEHTA N. C., DUBACH P., 1963. Separation of carbohydrates and nitrogen compounds from humic substances by Sephadex gel filtration and ion exchange chromatography. *Z. Pflanzenernähr.* **103**, 1-9.

ROVIRA A. D., GRAECEN E. L., 1958. *Austral. J. agric. Res.*, **8**, 659 d'après MEHTA, DUBACH et DEUEL (1961).

SAINI G. R., 1966. Sequestering of iron and aluminium by soil polysaccharides. *Curr. Sci.*, **36**, 259-260.

SALOMON M., 1962. Soil aggregation organic matter relations-ships in Redtoppotato rotations. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **26**, 51-54.

SALTON M. R. J., 1961. *Microbial Cell Walls*, N. Y. J. Wiley and Sons ed.

SHARON N., JEANLOZ R. W., 1959. Isolation of a diaminohexose from *Bacillus subtilis*. *Biochim. Biophys. Acta*, **31**, 277-278.

SÖRENSEN H., 1963. *Formation of soil organic matter during decomposition of plant components. The use of isotopes in soil organic matter studies.* Pergamon Press.

SOWDEN F. J., 1959. Investigation on the amounts of hexosamines found in various soils and methods for their determination. **88**, 138-143.

STEVENSON F. J., 1957. Investigations of amino-polysaccharides in soils. I. Colorimetric determination of hexosamines in soil hydrolysates. *Soil Sci.*, **83**, 113-122.

TOOGOOD J. A., LYNCH D. L., 1959. *Canad. J. Soil Sci.*, **39**, 151, 1959 d'après MEHTA, DUBACH et DEUEL (1961).

Von TORNE E., 1965. Experimentelle Untersuchungen über den Einfluss der Lebens Tätigkeit von Mikroorganem und Bodentieren auf den Abbau von Zellulose. *Pedobiologia*, **5**, 211-227.

VANCURA V., 1960. Composition of capsula polysaccharides of smooth and rough types of colonies of Azotobacter chroococcum. *Folia microbiologica*, **5**, 100-105.

WEBBER L. R., 1965. Soil polysaccharides and aggregation in crop sequences. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **29**, 39.

WENT J. C., JONG F. de, 1966. Decomposition of cellulose in soils. *Antonie von Leenwenhock*, **32**, 39-56.

WHISTLER R. L., KIRBY K. W., 1956. Composition and behavior of soil polysaccharides. *J. amer. chem. Soc.*, 1755-1759.

Ann. agron., 1968, **19** (1), 83-95.

QUELQUES PRÉCISIONS CONCERNANT LES CONDITIONS D'EMPLOI DE L'URÉE DANS CERTAINS SOLS DU SUD-OUEST DE LA FRANCE

W. ROUTCHENKO et E. LUBET
avec la collaboration technique de Y. POULETTE

Station d'Agronomie,
Service d'Expérimentation et d'Information,
Centre de Recherches agronomiques du Sud-Ouest, 33- Pont-de-la-Maye
Institut national de la Recherche agronomique

SOMMAIRE

Étude des conditions d'hydrolyse et de migration de l'urée dans un sol de sable limoneux, en fonction du régime hydrique. Les variations susceptibles de se produire dans la nutrition d'un maïs selon les conditions d'emploi de l'urée sont appréciées au moyen d'analyses de plantes.

INTRODUCTION

Au cours de l'été 1966, on a fréquemment observé dans le sud-ouest de la France des déficiences azotées sur maïs, alors que dans certains cas celui-ci avait été bien approvisionné en azote. Ces déficiences ont été généralement attribuées au lessivage des apports, en raison de la pluviométrie élevée du mois de juin : 107 mm, contre une moyenne de 84 mm.

Nous avons eu l'occasion d'étudier ce phénomène sur un dispositif expérimental établi suivant le système des blocs, en sol de sable limoneux, dont la composition chimique et physique est indiquée dans le tableau 1.

L'ensemble du dispositif a été fertilisé comme suit :

avant labour : { N : 140 kg/ha, urée ; P_2O_5 : 120 kg/ha, superphosphate à 45 p. 100 ; K_2O : 80 kg/ha, chlorure de potassium ;

sur labour : 440 kg/ha de chaux magnésienne, représentant
240 kg/ha de CaO
155 kg/ha de MgO

TABLEAU I

Composition du sol et du sous-sol
Gaillères (Landes)

Composition chimique			Constitution physique		
	Sol	Sous-sol		Sol	Sous-sol
pH eau	5,1	5,85	Colloïdes minéraux p. 100	5,7	6,3
pH KCl N	4,40	4,55	Limon —	9,8	9,7
Azote p. 1 000	0,60	0,46	Sables 20-50 μ —	10,5	11,0
Carbone p. 1 000	7,70	4,40	— 50-200 μ —	12,5	12,5
C/N	12,8	9,6	— 200-2 000 μ —	59,0	58,5
Capacité d'échange	4,5	4			
K échangeable p. 1 000	0,050	0,040	Matière organique p. 100	1,3	0,7
Na — —	0,016	0,013			
Ca — —	0,282	0,282	Hé éq. p. 100	8,4	8,5
Mg — —	0,031	0,028			
P_2O_5 citrique p. 1 000	0,118	0,070			

TABLEAU 2

Composition chimique des plantes
Éléments en mg/l de suc

	Plantes normales Bloc II	Plantes déficientes Bloc IV
Azote		
NO_3^-	550	320
NH_4^+	6	14
Aminé + amidé	294	178
Protéique	101	37
Azote soluble total	951	549
Phosphore		
$PO_4H_2^-$	12	8
Glucidique	134	106
Protéique	114	38
Phosphore soluble total	260	152
Soufre		
SO_4^{--}	50	35
Organique	94	37
Soufre soluble total	144	72
Cl^-	1 136	1 562
K^+	2 100	4 150
Ca^{++}	110	73
Mg^{++}	237	199
Na^+	14	125

Les différents traitements mettaient en comparaison diverses formules d'engrais appliqués en localisation. Nos observations ont porté sur l'ensemble du dispositif, et plus particulièrement sur les parcelles ayant reçu au semis un engrais complet N-P-K 20-20-24 représentant par hectare 20 kg d'azote mi-nitrique, mi-ammoniacal.

La levée et la croissance des plantes ont été homogènes sur l'ensemble du dispositif jusqu'au stade 7 feuilles ; de violents orages mirent alors fin à une période sèche. Les blocs I et IV restèrent submergés pendant plusieurs heures ; le II et le III, bénéficiant d'un léger exhaussement de terrain, furent rapidement ressuyés.

A partir de ce moment, l'aspect des plantes s'est différencié :

— croissance normale sur les blocs II et III ;

— croissance ralentie, suivie de l'apparition de symptômes d'une déficience en azote, sur les blocs I et IV ; ces symptômes s'aggravèrent avec le temps. Le rendement en grains de ces derniers blocs fut réduit de 31 p. 100 par rapport aux premiers.

Le tableau 2 donne les résultats de l'analyse des plantes provenant des deux situations, 48 heures après le dernier orage.

L'analyse révèle une baisse importante des taux de N, P et S. Elle indique par contre un accroissement des taux de Cl^-, K^+ et Na^+. L'absorption des cations bivalents Ca^{++} et Mg^{++} paraît déprimée.

La différence des conditions de milieu ne porte que sur le micro-relief et, par suite, sur le régime hydrique ; il est par conséquent permis d'y rattacher les variations de la composition chimique des plantes.

L'ensemble des observations permet de retenir les trois hypothèses suivantes :

— entraînement de l'azote en profondeur,

— retard de l'évolution de l'urée en raison des conditions de milieu,

— réduction de l'activité des plantes ayant subi une submersion temporaire.

L'entraînement des nitrates dans un sol léger ne peut surprendre, mais on considère généralement que l'azote ammoniacal est bien retenu par le complexe du sol. Quant à l'urée, elle est très soluble, et n'est pas fixée par le sol tant qu'il n'y a pas eu hydrolyse. Mais ce phénomène, qui transforme l'urée en sel d'ammonium, peut s'opérer très rapidement, 2 ou 3 jours suffisant dans la majorité des cas, ce qui conduit souvent à penser qu'il n'y a pas lieu de craindre des pertes, par lessivage, de l'azote apporté sous forme d'urée. En fait, il ne faut pas trop généraliser cette conclusion, puisque SOUBIES et *al.* (1955), dans leur étude sur l'évolution de l'urée, avaient déjà précisé que « dans les sols très perméables, pauvres en matière organique, à vie microbienne ralentie, pauvres en uréase, une application par temps froid n'est pas recommandée si l'on est exposé à des pluies importantes pouvant entraîner l'urée incomplètement hydrolysée vers le sous-sol profond ». Dans le même ordre d'idées, les observations que nous avons présentées plus haut nous ont conduits à étudier certains facteurs intervenant dans la migration et l'hydrolyse de l'urée, dans le type de sol considéré, largement répandu dans le sud-ouest de la France.

PREMIÈRE EXPÉRIENCE : MIGRATION DES DIFFÉRENTES FORMES D'AZOTE DANS LE SOL CONSIDÉRÉ, ENRICHI EN URÉE

Conditions expérimentales

Dans des tubes en verre de 50 × 300, munis d'une toile de nylon à la partie inférieure, on introduit 100 g de sol séché à l'air et additionné de 50 mg d'urée à 46 p. 100. Le sol est nivelé et recouvert d'un disque de papier-filtre, puis on introduit une nouvelle fraction de 100 g de sol enrichi, et ainsi de suite jusqu'à ce que 6 couches successives remplissent le tube. Sur le dernier filtre, on verse des billes de verre qui le maintiennent en place.

De l'eau distillée est ajoutée à raison de 25 cm^3 toutes les 24 heures, pendant 5 jours. Ces 125 cm^3 représentent la quantité d'eau nécessaire pour humecter la totalité du sol sans percolation, et correspondent à une hauteur totale de pluie de 63,5 mm, et à 2,45 Héq. (humidité équivalente). La température est maintenue à 20°C.

Le sixième jour, les tranches successives de sol sont extraites par pression ; elles se séparent facilement, grâce aux filtres. Chaque échantillon est transféré avec son filtre dans une fiole plastique de 600 cm^3, avec 20 g de SO_4Ba.

De l'eau distillée est ajoutée, en sorte que le rapport sol/eau soit de 1 à 4 ; on agite pendant 15 minutes. On opère de même sur un témoin de sol enrichi, mais conservé sec jusqu'à l'extraction (1).

Sur l'extrait aqueux filtré, on effectue les déterminations suivantes :

N (NH_4^+) : par colorimétrie de la réaction de Nessler en milieu citrique, suivant MAGNITSKI (1959) et BEAR (1964).

N (NO_3^-) : par la réaction de Griess, précédée d'une réduction par Zn + SO_4Cd suivant GRAU et MIRNA (1957), avec modifications.

N (total) : par la réaction de Nessler après minéralisation, suivant CHTCHETININA et BOUTENKO (1957).

Résultats analytiques

Les chiffres figurant au tableau 3 font apparaître que :

— près de 85 p. 100 de l'azote réparti dans les 30 cm de hauteur se retrouvent dans la tranche comprise entre 25 et 30 cm ;

— l'azote nitrique se concentre également dans la même zone ; on enregistre un enrichissement global par rapport au témoin de 3,68 mg, qui indique que la nitrification s'est poursuivie pendant l'expérience ;

— les taux d'azote ammoniacal croissent à tous les niveaux ; on constate un enrichissement total de 12,96 mg. L'azote ammoniacal néoformé provient essentiellement de l'hydrolyse de l'urée, en raison de la pauvreté du sol en matière organique.

— l'azote résiduel représente principalement l'urée non hydrolysée et se trouve entraîné au-dessous de 25 cm pour près de 84 p. 100 de l'urée ajoutée.

L'expérience montre que l'azote de l'urée, apportée en sol sec humidifié ensuite pendant 5 jours à un taux équivalent à 12,5 mm de pluie par jour, peut être entraîné, pour environ 85 p. 100, sous une forme non hydrolysée, à une profondeur dépassant 25 cm.

Quant à l'azote passé sous forme minérale (NH_4^+ principalement), il se retrouve également en majeure partie entre 20 et 30 cm. La couche 25-30 cm renferme la presque totalité de l'azote nitrique.

(1) En sols non enrichis, des essais ont montré que l'infiltration était plus rapide qu'en sols enrichis en urée.

Ces résultats prouvent que l'hydrolyse de l'urée peut être moins rapide qu'il n'est admis généralement et que le danger de lessivage est très réel, dans les sols de même composition que celui expérimenté.

TABLEAU 3

Azote en mg dans les extraits aqueux des tranches successives de 5 cm de hauteur, correspondant à 100 g de sol enrichi par 23 mg d'azote de l'urée

	N total	N (NO_3^-)	N (NH_4^+)	N autre que NO_3^- et NH_4^+
Témoin	30,00	4,40	0,66	24,94
0- 5 cm	1,76	0,08	1,36	0,32
5-10 cm	2,30	0,12	1,47	0,71
10-15 cm	3,04	0,16	1,95	0,93
15-20 cm	3,80	0,28	2,48	1,04
20-25 cm	15,84	1,44	3,48	10,92
25-30 cm	151,20	28,00	6,16	117,04
Total dans les 30 cm de sol	177,94	30,08	16,90	130,96
Différence par rapport à témoin × 6	— 2,06	+ 3,68	+ 12,94	— 18,68

DEUXIÈME EXPÉRIENCE : ÉVOLUTION DE L'URÉE DANS LE SOL PENDANT SIX SEMAINES EN FONCTION DU TAUX D'HUMIDITÉ

Afin d'apprécier le rôle joué par le degré d'humectation du sol dans la vitesse d'hydrolyse de l'urée, on a procédé à une nouvelle expérience. Pour permettre la comparaison des résultats des différents essais, le taux d'enrichissement du sol en urée est maintenu à 0,23 p. 1 000 N, bien que ce taux soit excessif par rapport aux doses en usage dans la pratique agricole.

Conditions expérimentales

Des vases contenant 1 kg du même sol séché à l'air, enrichi ou non par de l'urée (230 mg N par kg), sont humidifiés à trois niveaux :

1 Héq., soit 85 cm^3 d'eau distillée,
2 Héq., soit 170 cm^3 d'eau distillée,
3 Héq., soit 255 cm^3 d'eau distillée.

Les vases sont placés dans une chambre froide à 10°. Les taux d'humidité sont maintenus constants.

Toutes les semaines, un échantillon de chaque traitement est analysé. On détermine : le pH, le taux de l'azote nitreux, le taux de l'azote nitrique, le taux de l'azote ammoniacal. On utilise les mêmes procédés d'extraction et de dosage que lors de la première expérience, l'azote nitreux étant apprécié par la colorimétrie de la réaction de Griess sans réduction préalable. Le pH est celui de l'extrait aqueux.

Résultats analytiques

A la lecture du tableau 4, on constate que le pH varie peu dans les sols non enrichis et évolue entre 5,0 et 5,5, alors qu'en présence d'urée il monte jusqu'à 8,75, les valeurs les plus élevées s'observant deux ou trois semaines après les apports dans les traitements 1 Héq. et 2 Héq. Ces résultats concordent avec ceux obtenus par COURT et *al.* (1962).

TABLEAU 4

Évolution des pH des extraits aqueux
Essai n° 2

Nombre de semaines après l'addition de l'urée	1 Héq.		2 Héq.		3 Héq.	
	Sans urée	Avec urée	Sans urée	Avec urée	Sans urée	Avec urée
1	5,40	7,05	5,30	7,20	5,50	7,35
2	5,10	8,50	5,10	8,75	5,40	7,60
3	5,15	7,95	5,10	7,85	5,80	7,35
4	5,25	7,60	5	7,30	5,20	7,55
5	5,20	7,50	5	7,10	5,25	7,40

En l'absence d'apport d'urée, le taux de NH_4^+ évolue entre 17 et 32 mg par kg de sol (tabl. 5), tandis qu'en sol enrichi il s'élève considérablement pour atteindre le maximum à la fin de la 2e semaine dans les traitements 1 Héq. et 2 Héq. ; il y a manifestement une relation positive avec les fluctuations du pH.

TABLEAU 5

Évolution des taux de N (NH_4^+)
(mg/kg de sol)
Essai n° 2

Nombre de semaines après l'addition de l'urée	1 Héq.		2 Héq.		3 Héq.	
	Sans urée	Avec urée	Sans urée	Avec urée	Sans urée	Avec urée
1	23	80	22	106	28	74
2	22	205	22	185	17	107
3	28	168	32	162	32	93
4	28	164	16	164	19	110
5	22	169	22	164	22	98

Les taux de NH_4^+ dans le traitement 3 Héq. paraissent refléter les difficultés de prélèvement d'un échantillon homogène sur sol détrempé.

En soustrayant les taux de NH_4^+ des témoins, des valeurs correspondantes des échantillons enrichis, on obtient sensiblement (tabl. 6) les quantités d'azote NH_4 provenant de l'hydrolyse de l'urée. (L'addition d'urée ne modifie guère la minéralisa-

tion de l'azote du sol qui de toute façon reste faible, étant donné la pauvreté en matière organique, la température et la durée de l'expérience).

TABLEAU 6

Quantités de N (NH_4^+) provenant de l'hydrolyse de l'urée selon les traitements et les dates de prélèvement

(N en mg/kg de sol)

Essai n° 2

Nombre de semaines après addition de l'urée	1 Héq.	2 Héq.	3 Héq.
1	57	84	46
2	183	163	90
3	140	130	61
4	136	148	91
5	147	142	76

Les taux maximum apparaissent deux semaines après addition ; ils correspondent à :

80 p. 100 de l'azote apporté sous forme d'urée dans le traitement 1 Héq.
71 p. 100 de l'azote apporté sous forme d'urée dans le traitement 2 Héq.
39 p. 100 de l'azote apporté sous forme d'urée dans le traitement 3 Héq.

TABLEAU 7

Évolution des taux de N (NO_2^-)

(mg/kg de sol sec)

Essai n° 2

Nombre de semaines après addition de l'urée	1 Héq.		2 Héq.		3 Héq.	
	Sans urée	Avec urée	Sans urée	Avec urée	Sans urée	Avec urée
1	0,20	1	0,25	1,50	0,29	0,66
2	0,25	2,20	0,25	2,75	0,20	0,55
3	0,12	1,25	traces	3,75	traces	0,37
4	traces	1,62	traces	3,37	traces	0,62
5	0,30	2,15	0,20	2,95	0,20	0,50

Dans les sols enrichis avec de l'urée, les teneurs en azote nitreux sont régulièrement supérieures à celles du témoin (tabl. 7). Les taux maximum se rencontrent à 2 Héq. et les plus faibles à 3 Héq. Le maximum, atteint la 3e semaine, est voisin du seuil de toxicité, qui se situe à 4 p.p.m. dans un sol à pH 5, mais s'élève à 75 p.p.m. à pH 7 (BINGHAM, 1954).

La nitrification, déprimée au début, se manifeste à partir de la 3e semaine (tabl.8) Lors du dernier dosage, on trouve les mêmes taux de NO_3^- en sol non enrichi, quel que soit le degré d'humectation.

Dans les échantillons comportant des apports d'urée, les niveaux de NO_3^- s'élèvent considérablement au bout de 5 semaines pour les traitements 1 Héq. et 2 Héq., alors que pour 3 Héq. cette intensification est à peine perceptible.

TABLEAU 8

Évolution des taux de N (NO_3^-)
(en mg/kg de sol sec)

Nombre de semaines après addition de l'urée	1 Héq.		2 Héq.		3 Héq.	
	Sans urée	Avec urée	Sans urée	Avec urée	Sans urée	Avec urée
1	29	12	15	14	16	6
2	22	25	16	18	6	6
3	16	25	14	20	5	10
4	18	26	16	24	15	19
5	38	65	36	66	36	26

Les résultats montrent que :

— les apports d'urée peuvent provoquer une élévation importante du pH, corrélativement avec la libération de NH_4^+ ; les valeurs les plus élevées sont atteintes la 2e ou la 3e semaine.

Malgré l'importance des apports d'urée, les taux de nitrites ne paraissent atteindre des niveaux dangereux pour les plantes que pendant un court laps de temps, qui se situerait la 3e ou 4e semaine après l'incorporation de l'urée.

Ces deux constatations sont en accord avec les observations faites par BRIOUX (1926), COURT et *al.* (1962).

— Des taux d'humidité élevés (3 Héq.) provoquent un ralentissement de l'hydrolyse et inhibent partiellement la nitrification.

ESSAI COMPLÉMENTAIRE

Cet essai avait pour but d'étudier l'hydrolyse de l'urée en sol sec.

Conditions expérimentales

Du sol séché à l'air jusqu'à ne plus contenir que 1,8 p. 100 d'humidité est enrichi en azote sous forme d'urée (230 mg N par kg) ; il est conservé à 10° pendant 6 semaines, puis un échantillon enrichi et un autre non enrichi sont analysés. Une analyse identique est effectuée sur les mêmes échantillons humidifiés à 2 Héq. 48 heures avant l'analyse.

Résultats analytiques

On constate (tabl. 9) que l'évolution de l'urée pendant les 6 semaines de conservation en sol à 1,8 p. 100 d'humidité est faible, comme on pouvait le supposer, alors qu'on enregistre après 48 heures un début d'hydrolyse dans les échantillons humidifiés à 2 Héq. A la suite de ces résultats, nous avons voulu nous rendre compte de la façon dont la plante réagirait après de telles conditions. Dans ce but, une troisième expérience a été réalisée.

TABLEAU 9

Essai complémentaire

Évolution du pH et de différentes formes d'azote en fonction de l'humidité du sol

(N en mg/kg de sol)

Traitement du sol	pH		N (NH_4^+)		N (NO_2^-)		N (NO_3^-)	
	Sans urée	Avec urée	Sans urée	Avec urée	Sans urée	Avec urée	Sans urée	Avec urée
6 semaines à 1,8 p. 100 d'humidité	5,1	6	4	7,8	0,3	0,4	39,3	44,9
Hydraté à 2 Héq. 48 h avant analyse.....	5,2	7,85	2,6	17,1	0,3	1,6	46,2	61,2

TROISIÈME EXPÉRIENCE :

COMPORTEMENT DU MAÏS EN SOL ENRICHI OU NON AVEC DE L'URÉE, EN FONCTION DU TAUX D'HUMIDITÉ ENTRETENU PENDANT LA VÉGÉTATION

Conditions expérimentales

L'essai est conduit sous serre, en vases de végétation. On utilise le même sol à 1,8 p. 100 d'humidité, enrichi à raison de 0,23 p. 100 en azote sous forme d'urée, six semaines avant le semis, et conservé sec.

Du maïs *Funk G 75* est semé. A partir de ce moment, une série de vases est alimentée en eau au taux de 2 Héq., une autre au taux de 3 Héq. Des plantes témoins sont cultivées dans les mêmes conditions sur sol non enrichi. La récolte est faite 6 semaines après la levée, au stade de 4 ou 5 feuilles.

Résultats

On constate tout d'abord que la croissance des plantes provenant des sols enrichis a été nettement déprimée :

	2 Héq.	3 Héq.
Poids de mat. fraîche des plantes témoins ..	24,60 g	20,00 g
Poids de mat. fraîche des plantes fertilisées .	12,20 g	11,10 g

On constate également que le passage de 2 Héq. à 3 Héq. se traduit par une réduction de croissance, aussi bien dans le cas des plantes témoins que dans celui des plantes fertilisées.

TABLEAU 10

Taux des éléments restant dans les plantes sous forme ionique
en méq./kg de matière fraîche

	Plantes témoins (Sol n'ayant pas reçu d'apport d'azote)		Plantes cultivées sur sol enrichi à 0,23 p. 1 000 d'azote de l'urée	
	Humidité maintenue à :		Humidité maintenue à :	
	2 Héq.	3 Héq.	2 Héq.	3 Héq.
NO_3^-	58,25	26,27	22,55	7,70
$PO_4H_2^-$	0,30	0,35	0,41	0,58
SO_4^{--}	4,19	3,99	6,18	5,98
Somme des anions	62,74	30,61	29,14	14,26
NH_4^+	traces	0,57	18,50	2,82
K^+	52,17	45,01	35,80	38,87
Ca^{++}	4,59	2,79	1,59	1,59
Mg^{++}	20,99	17,19	16,39	13,59
Na^+	0,78	0,95	0,78	1,04
Somme des cations	78,53	66,51	73,06	57,91
Poids de matière fraîche produite par 10 plantes	24,60	20,00	12,20	11,10

Le statut minéral des plantes est aussi influencé d'une façon caractéristique (tabl. 10) :

— dans les plantes cultivées sur sol enrichi, on trouve moins de nitrate, de phosphore, de potassium, de calcium et de magnésium, mais plus d'ammonium que dans les plantes témoins ;

— dans les plantes provenant des sols à 3 Héq., on trouve moins de nitrate, de calcium et de magnésium, plus de chlore et de sodium, que dans les plantes à 2 Héq ;

— dans les plantes provenant des vases fertilisés, on constate une inversion des taux de NH_4^+ et de K^+ sous l'effet de l'accroissement de l'humidité.

L'explication de ce phénomène doit être recherchée dans les variations du niveau de NH_4^+ du sol : très élevé à 2 Héq. et modéré à 3 Héq. déterminant une dépression de l'absorption de K plus importante à 2 Héq.

On voit que l'ensemble des résultats conduit à des conclusions rappelant celles suggérées par l'analyse des plantes du dispositif (tabl. 2). L'évolution des taux des différents ions est conforme aux actions antagonistes et synergiques ayant pour point de départ la forme ionique et le niveau de l'azote fourni à la plante, l'inhibition partielle de la nitrification en présence de taux élevés de NH_4^+ et d'humidité excessive, une plus grande activité des cations monovalents lorsque l'importance de la phase liquide dans le sol augmente.

Les résultats analytiques indiquent que la réduction de croissance des plantes fertilisées peut être attribuée, au moins en partie, quel que soit le taux d'humidité, à une insuffisance de K, Ca et Mg, et à des causes particulières à chacun des régimes de l'alimentation en eau :

— à 2 Héq., le taux de NH_4^+ atteint le seuil toxique (DELMAS et ROUTCHENKO, 1962),

— à 3 Héq., la nutrition azotée devient insuffisante, phénomène en partie masqué par la réduction de croissance.

L'examen des chiffres figurant au tableau II révèle que l'utilisation des formes intermédiaires du métabolisme (acides aminés et protéines solubles, phosphore glucidique) est fortement ralentie ; ces éléments s'accumulent dans la sève, faute d'une utilisation dans les tissus et organes nouvellement formés ; quant au soufre, même son intégration primaire est fortement déprimée.

TABLEAU II

Taux des éléments métaboliques présents dans les plantes sous différentes formes
(en mg/kg de matière sèche)

	Plantes témoins (Sol n'ayant pas reçu d'apport d'azote)		Plantes cultivées sur sol enrichi à 0,23 p. 1 000 d'azote de l'urée	
	Humidité maintenue à :		Humidité maintenue à :	
	2 Héq.	3 Héq.	2 Héq.	3 Héq.
Azote (NO_3^-)	816	368	316	108
— (NH_4^+)	traces	8	259	40
— aminé + amidé....	224	408	2 080	1 290
— protéique	156	218	350	308
— soluble total	1 196	1 002	3 005	1 746
Phosphore ($PO_4H_2^-$)	10	11	13	18
— glucidique	560	680	740	840
— protéique + phytinique .	121	191	144	250
	691	882	897	1 108
Soufre (SO_4^{--})	67	64	99	96
— organique	113	80	77	92
— soluble total	180	144	176	188

CONCLUSION

Les divers résultats enregistrés au cours de la présente étude peuvent être résumés comme suit :

en sol filtrant, pauvre en colloïdes minéraux et humiques, l'emploi de l'urée appelle à certaines réserves. Si cet engrais est apporté en sol sec, et que des précipita-

tions abondantes succèdent à une période sèche, une fraction importante peut être entraînée en profondeur, sous forme non hydrolysée, et devenir alors inaccessible à la plupart des plantes annuelles. Par contre, une hydrolyse intense de l'urée appliquée à dose élevée, survenant au début du stade végétatif, peut réduire la croissance des plantes (toxicité ammoniacale notamment).

Les études effectuées montrent combien il est difficile, surtout en présence de certaines conditions pédoclimatiques, de prévoir si l'alimentation azotée des cultures sera satisfaisante à partir des engrais apportés, notamment de l'urée. Ces études montrent aussi l'intérêt que présentent à ce sujet certaines techniques comme l'analyse des sucs des plantes, pour préciser les risques d'insuffisance ou d'excès d'azote en cours de végétation.

Reçu pour publication en mai 1967.

SUMMARY

VARIOUS PARTICULARS ON THE INCORPORATION OF UREA INTO CERTAIN SOILS OF SOUTH-WESTERN OF FRANCE

Having discovered nitrogen deficiency in maize crops fertilized with urea, the soil being of a loamy-sand type, the authors investigated the migration and evolution of this fertilizer in terms of water-inflow conditions. Additionally to the determination made from plants grown in fields (sap analyses), tests were also carried out in both laboratory and greenhouse, for the determination of the various forms of nitrogen soluble in the soil after incorporation of urea, dependently on the depth and conditions of water inflow, and the effects of urea on the growth and sap composition of the plants according to the moisture of the soil.

In the soil considered, heavy rainfall may wash off the urea, as late as six weeks after its admixture if the moisture was previously inadequate to provide significant hydrolysis.

An abrupt increase in humidity may also give rise to a sharp liberation of NH_4, concomitantly with a substantially increased pH value, thus slowing down the growth of young plants owing to excessive absorption of NH_4, together with a reduced absorption of K, Ca and Mg.

High moisture contents slow down the hydrolysis of urea but do not, in any case, promote growth of the plants.

ZUSAMMENFASSUNG

EINIGE PRAZISIONEN UBER DIE ANWENDUNG VON HARNSTOFF IN BESTIMMTEN BODEN SUD-WEST-FRANKREICHS

Nachdem man einen Mangel an Stickstoff bei mit Harnstoff gedüngten und auf lehming-sandigen Böden angebauten Maiskulturen festgestellt hat, untersuchen die Verfasser die Wanderung und die Entwicklung dieses Düngemittels in Abhängigkeit von der Wasserzufur.

Ausser den Bestimmungen, die mit den auf oftenem Teld wachsenden Pflanzen durch geführt wurden (Analyse des Saftes), wurden Versuche im Laboratorium und im Gewächshaus fortgesezt (Bestimmung der verschiedenen Formen des löslichen Stickstoffes im Boden nach Harnstoffverabreichung. je nach der Tiefe und den Verhältnissen der Wasserzufuhr ; Einfluss des Harnstoffse auf das Wachstun und auf die Zusammensetzung des Pflanzensaftes, im Verhältnis zur Bodenfeuchtigkeit).

In dem beobachteten Boden, Kann der Harnstoff, sogar 6 Wochen nach seiner Verabreichung, durch starke Niederschläge ausgelaugt werden, wenn die Feuchtigkeit vorher nicht auswichte, um eine nennenswerte Hydrolyse zu erlauben.

Ausserdem kann ein plötzlicher Feuchtigkeitszuwachs, begleitet von einer beträchtlichen Zunahme des pH, eine brutale Freigabe von NH_4, begleitet von einer Herabsetzung der Absorption von K, Ca und Mg, das Wachstum der jungen Pflanzen herabdrücken kann.

Sehr hohe Feuchtigkeitsraten verursachen eine Verlangsamung der Harnstoffhydrolyse. Sie sie sind jedoch auf jeden Fall, wenig vorteilhaft für das Wachstum der Pflanzen.

РЕЗЮМЕ

Несколько уточнений условий применения мочевины в некоторых почвах юго-запада Франции.

В. РУТЧЕНКО, Е. ЛЮБЭ.

Отметив недостаточность азота в посевах кукурузы удобренных мочевиной на суглинистых почвах, авторы изучали миграцию и эволюцию этого удобрения в зависимости от режима поливов. Кроме определений проведенных в полевых условиях на растениях (анализы пасоки), опыты продолжались в лабораторных и тепличных условиях (определение разных форм азота растворимого в почве после подкормок мочевиной, в зависимости от глубины и от режима поливов; влияние мочевины на рост растений и на состав их пасоки, в зависимости от влажности почвы).

В рассматриваемой почве, мочевина может вымываться сильными дождями даже 6 недель после ее внесения, если влажность недостаточна для значительного гидролиза. Внезапное увеличение влажности может вызвать также резкое освобождение NH_4 и сильное увеличение кислотности, что может пагубно отозваться на молодых растениях, в виду избыточного поглощения ими NH_4, сопровождающегося ослаблением поглощения K, Ca и Mg.

Избыточная влажность хоть и вызывает замедление гидролиза мочевины, но скорее благоприятна для роста растений.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BEAR F. E., 1955. *Chemistry of the soil.* The Waverly Press Inc.

BINGHAM F. T., 1954. Solution culture studies of nitrites toxicity to plants. *Canad. Soil Sci.*, 305-308.

BRIOUX Ch., 1936. Action de l'urée comme engrais azoté. Son influence sur la réaction du sol. *C. R. Acad. Sci.*, **8**, 2.

CHTCHETININA L. L., BOUTENKO V. A., 1957. Dosage colorimétrique d'azote total dans le sol et les végétaux *Pochvovedenie*, **8**, 98-101.

COURT M. M., STEPHEN R. C., WAID, 1962. Nitrites toxicity arising from the use of urea as fertilizer. *Nature*, **4835**, 1264.

DELMAS J., ROUTCHENKO W., 1962. Contribution à l'étude de la composition minérale du suc de maïs soumis à deux types d'alimentation azotée, l'une totalement nitrique, l'autre totalement ammoniacale. *Ann. agron.*, **13** (6), 575-586.

GRAU R., MIRNA A., 1957. *Z. anal. Chem.*, 152-158.

MAGNITSKI K. P., 1959. *Méthodes modernes d'analyse des plantes et des sols.* Ed. Selchos guis, Moscou.

SOUBIES L., GADET R., LENAIN M., 1955. Recherches sur l'évolution de l'urée dans les sols et sur son utilisation comme engrais azoté. *Ann. agron.*, **6**, 997-1033.

Ann. agron., 1968, **19** (1)

CHRONIQUE DES LIVRES

BEUTELSPACHER H., VAN DER MAREL H. W. — ATLAS OF ELECTRONMICROSCOPY OF CLAY MINERALS AND THEIR ADMIXTURES. — Amsterdam, London, New York, Elsevier Publishing Company, 1968, 333 p.

Ce volume réalisé en collaboration par deux auteurs très connus par leurs travaux dans le domaine des argiles, est rédigé en deux langues : anglais, allemand.

C'est le premier d'une série en 4 volumes qui couvrira les principales méthodes d'étude des argiles.

Cet ouvrage est avant tout un atlas, aussi sa présentation est-elle très simple et très claire. Dans une première partie, avec de nombreux schémas, quelques bases sont rappelées : les principes de la microscopie électronique, la description des microscopes, et surtout les méthodes de préparation des échantillons.

Les auteurs entreprennent ensuite l'étude systématique au microscope des principaux constituants de la fraction fine des sols : les argiles minéralogiques classiques (avec les interstratifiés), mais aussi tous les minéraux accessoires (oxydes, hydroxydes, quartz, carbonates, sulfates ...) et les composés amorphes.

La part prépondérante est laissée aux photos qui sont souvent de grand format (13/20), et qui essaient de présenter les différents faciès morphologiques possibles pour un même minéral. En particulier de nombreuses photos de minéraux accessoires ont été obtenues en préparant les échantillons par la méthode des répliques.

Cet atlas clair est complet ; et, s'il ne peut pas encore prétendre à la détermination systématique des minéraux argileux, il peut néanmoins rendre des services appréciables dans de nombreuses recherches portant aussi bien sur les sols que sur les sédiments.

M. R.

DIE ERHÖHUNG DER FRUCHBARKEIT DER SANDBÖDEN, VORTRÄGE DER INTERNATIONALEN KOORDINIERENDEN ARBEITSTAGUNG IN BUDAPEST 1965 (Accroissement de la fertilité des sols sableux, comptes rendus de la session internationale de coordination tenue à Budapest en 1965), — Akademia Kiado, Budapest, 1967, 446 p.

En août 1965 s'est tenue la 4e session agricole des pays socialistes européens sur les problèmes de culture des plantes sur sol sableux. Sur les 120 participants à cette conférence, 38 experts ont traité dans leurs communications des problèmes d'amélioration du sol, de fertilisation, d'irrigation et ont présenté les résultats qu'ils ont obtenus sur les sujets suivants :

— l'influence de la bentonite sur les constantes hydriques des sols sableux,

— la vitesse d'infiltration des eaux dans des sols d'humidités différentes,

— l'ameublissement des sols sableux et son importance sur les cultures,

— l'amélioration par le labour et son influence sur la dynamique des matières organiques et des acides aminés dans le sol.

— la fertilisation ; engrais minéraux, azotés, magnésiens ;

— des études plus nombreuses concernant les engrais organiques, les engrais verts, les tourbes..., la profondeur d'enfouissement de ces engrais, leur action sur le développement des racines et sur la teneur en substances nutritives dans le sol ;

— le rôle des engrais verts dans les assolements sur sol léger ;

— l'influence de l'irrigation sur le rendement des cultures de luzerne et de betterave à sucre.

Ce volume intéressera non seulement les spécialistes de pédologie et les chercheurs étudiant la culture des plantes sur sol sableux, mais aussi les agriculteurs.

M. F.

GRAFF O., SATCHELL J. E., ed. — PROGRESS IN SOIL BIOLOGY. — PROCEEDINGS OF THE COLLOQUIUM ON DYNAMICS OF SOIL COMMUNITIES, Braunschweig-Völkenrode, 5-10 september 1966. Braunschweig, Friedr. Vieweg and Sohn GmbH ; Amsterdam, North-Holland Publishing Company, 1967, 656 p.

Cet ouvrage constitue les comptes rendus du Colloque sur la dynamique de la biocénose du sol, 3e colloque organisé par le Comité de Zoologie du Sol de l'Association internationale de Science du Sol, à Braunschweig-Völkenrode, en Allemagne, en septembre 1966.

Les 60 rapports (présentés en anglais, allemand ou français), sont classés en cinq chapitres : Échanges à l'intérieur de la biocœnose du sol. Influences externes sur la biocénose du sol. Influences humaines sur la biocénose du sol. Actions exercées par la biocénose du sol. Problèmes divers concernant la biocénose du sol (méthodologie et aspects géographiques).

Un résumé détaillé des rapports présentés écrit par le Dr VAN DER DRIFT, termine l'ouvrage qui est complété par un Index des genres.

GIRARD H., ROUGIEUX R. — TECHNIQUES DE MICROBIOLOGIE AGRICOLE. — 2e édition, Paris, Dunod, 1967, 216 p.

Cet ouvrage préfacé par M. le Professeur LEMOIGNE traite des techniques d'études de la flore microbienne intéressant l'agriculture, et plus particulièrement les industries agricoles. Il est rédigé en trois parties : la première traitant de techniques générales, la deuxième étudiant les grandes familles de microorganismes, la troisième donnant la liste de milieux de culture, celle des différents réactifs et colorants d'usage courant.

On notera de fréquentes références à la systématique, à l'étude de techniques simples pour caractériser les microorganismes, ainsi que des rappels théoriques précédant les études pratiques.

Les étudiants des Écoles nationales d'Agriculture et de l'Institut agronomique, ceux des Facultés, les techniciens des industries agricoles et tous ceux qui désirent se familiariser avec la microbiologie seront intéressés par ce livre.

MUTH O. H., ed. — FIRST INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SELENIUM IN BIOMEDICINE. — Oregon State University, September 1966. Westport (Connecticut), AVI Publ. Cny, 1967, 445 p.

Cet ouvrage contient 25 communications faites lors du premier symposium international sur le sélénium en biomédecine. Ce symposium organisé par le département de médecine vétérinaire de l'Université de l'Orégon, a permis de réunir pour la première fois des experts dans l'utilisation du sélénium dans les sciences biologiques.

On sait depuis longtemps que le sélénium est absorbé par de nombreuses plantes poussant sur des sols riches en cet élément et que certaines espèces peuvent en absorber jusqu'à 15 000 p.p.m.

Succédant à la découverte faite en 1957 par le docteur SCHWARZ, une recherche intensive a montré que le sélénium peut remédier à certaines maladies de carence chez des animaux et que 19 espèces y sont sensibles.

Le symposium traite de la répartition du sélénium dans les sols et dans les plantes, des méthodes d'analyse du matériel biologique pour la recherche du sélénium. Les conséquences de l'administration du sélénium à des sujets animaux et humains sont ensuite abordées : toxicité, déficiences, métabolisme et interrelations nutritionnelles.

Les chapitres traitant des effets bénéfiques de faibles apports de sélénium dans l'alimentation d'enfants et de bétail souffrant de maladies de carence et les relations existant entre le besoin en vitamine E et en sélénium, sont particulièrement intéressants. Une abondante bibliographie suit chaque chapitre.

RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 27, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles séparées seront utilisées pour les références bibliographiques, les tableaux, les légendes des figures et graphiques, etc.

Au début de chaque mémoire, on indiquera : — *le titre du mémoire :* il ne devra pas comporter d'abréviation ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs,* précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de... ; — *le nom de l'établissement,* dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

Les mémoires seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :
a) *sommaire :* résumé suffisamment précis pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction* dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé,* en donnant sous une forme concise, tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats* à présenter de la manière la plus brève possible ; e) *discussion et conclusion ;* f) *résumé* destiné à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour les collaborations, les fonds, les dons... ; h) *Références bibliographiques.*

Les travaux originaux en anglais doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français très *complet.* Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

Pour les autres documents (notes, mises au point , revues rapports, etc.) l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

Les références bibliographiques doivent être citées dans le texte de la manière suivante : DUPONT et DUVAL (1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de et *al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

Pour les articles : le (s) nom (s) de (s) auteur (s) suivi (s) des initiales du (des) prénom (s) ; la date de parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatres langues mentionnées) : le titre du périodique en abrégé, selon la World List of Scientific Periodicals, ou le Bulletin Signalétique du C.N.R.S. ; le volume ; la première et la dernière page de l'article.

Pour les ouvrages : le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés, et, si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera en plus le nom de l'auteur du chapitre cité, le nom des rédacteurs principaux, précédé de la mention « in », le titre de l'ouvrage.

La mention de « communication personnelle »ou « données non publiées » etc., doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d' « Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies, doivent être fournis à part. Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérotations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponibles est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit.

Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur feuille séparée, et porter les numéros des figures.

Les graphiques, schémas, cartes, dessins d'appareils seront envoyés *à l'état de projets,* leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5, *soit* × 0,25.

Il est rappelé que le format utile des Annales est : 16 × 24 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

Photographies : Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos 9 × 12, 4 photos 9 × 5,5, 6 photos 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible après clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur feuilles séparées et porter les numéros des figures.

Correction des épreuves : les auteurs recevront deux épreuves à corriger. Les corrections « d'auteur » ne sont autorisées que sur le premier jeu d'épreuves.

Envoi du manuscrit : M. HENIN, Centre national de Recherches agronomiques, 78 - Versailles France. On demande deux exemplaires.

Le Directeur de la Publication : M. L. CAGNAC

Imprimerie Bussière à Saint-Amand (Cher), France. — 5-68.

Dépôt légal : 2e trimestre 1968. N° d'impression : 1995.

Ann. agron., 1968, **19** (2), 103-128.

DYNAMIQUE DE L'AZOTE MINÉRAL EN SOL NU

A. LIBOIS
avec la collaboration technique de Odile MARCEL et G. LAVIELLE

Station d'Agronomie,
Centre de Recherches agronomiques du Centre-Est, 21 - Dijon
Institut national de la Recherche agronomique

SOMMAIRE

L'évolution de l'azote minéral a été suivie durant quatre années dans un sol nu de la région dijonnaise, à l'intérieur d'un dispositif expérimental mettant en comparaison différentes parcelles recevant ou non une fertilisation azotée minérale. Des prélèvements périodiques ont permis de suivre l'évolution de l'azote minéral provenant de la minéralisation des réserves du sol, ou résultant des différents apports minéraux.

INTRODUCTION

Parmi les problèmes multiples et complexes posés par l'utilisation de l'azote en agriculture, ceux ayant trait à la dynamique de l'azote minéral dans le sol sont à l'origine de nombreux travaux en raison de l'importance fondamentale de cette forme de l'azote dans la nutrition végétale.

L'objet essentiel de ces travaux est de tenter de définir les conditions et les modalités de la libération des réserves organiques du sol, ainsi que d'observer et d'interpréter les transformations nombreuses et les déplacements auxquels sont soumises, en fonction des conditions du milieu, les formes minérales de l'azote, qu'elles proviennent de la minéralisation de l'azote du sol ou d'apports.

Lorsqu'on se propose d'étudier ces problèmes, une simplification importante consiste à éliminer le facteur de perturbation que constitue le végétal et à travailler en sol nu. Cette méthode présente le grave inconvénient de supprimer les interactions, probablement nombreuses, qui jouent normalement entre le sol et le système racinaire en dehors même de l'absorption radiculaire. Mais elle demeure néanmoins un instrument d'approche précieux en ce sens qu'elle est la seule à permettre l'étude directe des relations jouant entre l'azote minéral, l'eau et le sol. Aussi, nombre d'auteurs l'ont-ils utilisée soit en cases lysimétriques, soit dans le sol en place, et ont-ils ainsi pu mettre en lumière différents phénomènes dont la connaissance se révèle très

utile pour orienter la conduite de la fertilisation azotée. En particulier, le rythme de la libération de l'azote minéral et ses variations saisonnières dans le sol ont pu être précisés sous les conditions du climat méditerranéen (LEFÈVRE et DROUINEAU, 1959) ; la migration hivernale de l'azote nitrique a été suivie à Toulouse en sol limoneux léger (SOUBIES, GADET et MAURY, 1951) ; la stimulation de la minéralisation printanière de l'azote du sol par des apports d'azote minéral a pu être mise en évidence dans des sols de la région parisienne (CHABANNES, BARBIER et DRIARD, 1961, 1963, 1964, 1967) ; diverses observations ont pu être faites sur le rythme de la minéralisation et de l'organisation de l'azote dans le sol en fonction des quantités d'azote minéral présentes (HÉBERT, LEFÈVRE et *al.*, 1965).

Dans le but d'essayer de préciser certains aspects de ces problèmes, sous les conditions climatiques semi-continentales du Centre-Est, nous nous sommes proposé, dans la présente étude, de suivre l'évolution de l'azote minéral libéré dans le sol en place, ou appliqué en surface, au cours d'une année entière sur l'ensemble du profil intéressé par la migration de l'azote provenant des apports.

TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES

1. *Conditions de milieu*

Les dispositifs expérimentaux ont été implantés chaque année sur des parcelles ayant porté l'année précédente une culture de régularisation qui avait reçu une fertilisation normale. Les déchets de récolte ont été enlevés.

Analyses physiques et chimiques du profil

Granulométrie p. 100	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100	100-120	140-160	180-200
< 2 μ	39,0	39,0	41,0	47,5	17,5	12,5	16,0	22,0
2-20 μ	23,5	23,0	22,0	21,0	15,0	15,5	28,0	30,0
20-50 μ	22,5	23,0	22,5	17,5	17,5	23,5	25,5	17,5
50-200 μ	12,0	11,0	10,5	11,5	42,0	38,5	25,5	25,0
200-2 000 μ	3,0	4,0	4,0	2,5	8,0	10,0	5,0	5,5
Densité apparente	1,16	1,21	1,21	1,28	1,28	1,55	1,55	1,60
Capacité au champ p. 100 T. S.....	25,4	24,1	24,3	26,8	18,1	17,3	15,0	13,9
C p. 1 000.....	14,5	13,3	9,1	4,5	2,7	1,3	1,0	1,0
N p. 1 000	1,45	1,22	0,87	0,49	0,31	0,18	0,13	0,14
C/N.....	10,0	10,9	10,5	9,1	8,7	7,2	7,6	7,1
pH KCl	7,05	7,15						
P_2O_5 p. 1 000	0,22	0,16						
K_2O p. 1 000.....	0,10	0,08						

Le sol est de type brun uniforme argilo-limoneux, à réaction légèrement alcaline, saturé en Ca avec traces de calcaire, présentant un horizon enrichi en argile entre 50-60 et 70-80 cm, reposant à 75 cm en moyenne sur une marne jaune contenant 12,5 à 25 p. 100 d'argile suivant les niveaux, et un taux élevé de sables fins et de CO_3Ca. Les tranches de 0 à 20 et de 20 à 40 cm sont caractérisées par un état organique moyen (respectivement 1,5 et 1,2 p. 1 000 d'azote organique avec un C/N voisin de 10).

La structure superficielle est de type grumeleux avec une tendance polyédrique vers 15-20 cm de profondeur. Structure polyédrique plus grossière dans la tranche de 20 à 35 cm, devenant très nette et tendant à s'orienter verticalement en dessous de 35 cm.

A partir de 60 cm de profondeur se présente une couche de marne altérée brune d'environ 20 cm d'épaisseur, de texture argileuse et de structure assez massive, présentant un réseau d'infiltrations limoneuses dans les galeries de vers où passent des racines très saines.

La marne jaune sous-jacente, d'abord altérée, à structure fragile et à tendance grossièrement prismatique sur une dizaine de centimètres, se présente ensuite sous la forme d'une roche très friable non structurée, sans litage très apparent et sans trace d'hydromorphie, avec des galeries de vers et de racines de plus en plus rares.

2. *Méthodes*

1. *Épandages.*

Exécutés à la main après cloisonnement de chaque parcelle en sous-parcelles de 1 m de côté, chacune d'elle étant traitée individuellement. Dix prélèvements de 50 cm^2 sur 10 cm de profondeur par m^2, répétés 6 fois, ont montré que l'hétérogénéité imputable à l'épandage n'excédait pas $\pm$ 10 p. 100 de la dose d'apport, cette hétérogénéité ayant tendance à s'estomper au cours de la migration dans les couches superficielles par suite des diffusions latérales.

2. *Préparation des échantillons.*

Le sol frais est fragmenté sur tamis de 2 cm, homogénéisé, et l'échantillonnage immédiatement effectué par prélèvements géométriques.

3. *Dosage de l'azote ammoniacal.*

Extractions par $CaCl_2$ et dosage après déplacement par MgO calcinée.

4. *Dosage de l'azote nitrique.*

Procédé Grandval et Lajoux par colorimétrie du sel trimétallique jaune d'ammonium de l'acide nitro-phénol disulfonique, sur l'extrait à l'eau additionnée de 0,50 g/l de SO_4Mg destiné à floculer l'argile.

Sur deux populations de 15 échantillons chacune provenant de deux prélèvements différents homogénéisés de sol, et présentant un taux moyen de N nitrique de 15,3 et 9,4 p.p.m. de terre sèche, les erreurs types ont été respectivement de 0,307 et 0,225 et la précision de 1,67 et 1,99 p. 100 de la moyenne.

5. *Protocole expérimental.*

Les essais ont été poursuivis durant quatre années dans des dispositifs expérimentaux qui étaient transportés chaque année sur de nouvelles parcelles. Ils ont servi à étudier la minéralisation de l'azote du sol en place et l'évolution de l'azote minéral ainsi formé, l'influence des apports d'azote minéral sur la minéralisation, ainsi que sur la dynamique de l'azote apporté sous différentes formes et à différents niveaux, selon les protocoles annuels suivants :

a) *Années 1963 et 1964.*

— Épandages effectués les 18 avril 1963 et 11 mars 1964.

— Dispositifs en blocs de Fisher 4 répétitions, comportant 4 traitements : un témoin sans apport minéral et trois parcelles ayant reçu 100 kg N/ha sous formes nitrique (nitrate de calcium), ammoniacale (sulfate d'ammonium) ou amidique (urée).

b) *Année 1965.*

— Épandage le 30 mars 1965.

— Dispositif en blocs de Fisher 6 répétitions, comportant 4 traitements : un témoin sans apport et deux parcelles ayant reçu 100 et 250 kg N/ha sous forme nitrique (nitrate de calcium).

c) *Année 1966.*

— Épandage le 30 mars 1966.

— Dispositif en blocs de Fisher 6 répétitions, comportant 3 traitements : un témoin sans apport, et deux parcelles ayant reçu 100 kg N/ha sous forme nitrique (nitrate de calcium) et ammoniacale (sulfate d'ammonium).

6. *Entretien du sol.*

Le sol est entretenu sans végétation par des passages réguliers superficiels de motobineuse pendant toute la durée des mesures.

7. *Mode et périodicité des prélèvements.*

Les prélèvements, régulièrement espacés de 14 jours, ont été effectués aux niveaux suivants :

1963 et 1964 : 0-10, 10-20, 20-30, 30-50, 50-75, 75-100 cm,
1965 et 1966 : 0-20, 20-40, 40-60, 60-80, 80-100 cm.

En outre, pour les quatre années d'essais, les prélèvements ont été régulièrement poursuivis par tranches de 20 cm au-dessous d'un mètre, jusqu'à un niveau tel qu'aucune différenciation n'était décelable entre parcelles témoin et traitées, de manière à suivre pendant toute la durée des expériences l'évolution de l'intégralité de l'azote minéral des apports.

Les prélèvements ont été effectués à la sonde droite en 6 points par parcelle dans les niveaux superficiels (0 à 30 cm ou 0 à 40 cm suivant les années) puis à la sonde tarière en un point par parcelle dans les niveaux sous-jacents.

RÉSULTATS

1. *Expression des résultats*

Les résultats sont exprimés en kg d'azote nitrique ou ammoniacal par hectare de terre sèche, la densité apparente ayant été déterminée pour chaque niveau intéressé et chaque fois qu'il a été nécessaire en surface, après un travail du sol précédant la mise en place ainsi qu'au cours de son tassement. Compte tenu de cette correction, les résultats de prélèvements exécutés immédiatement après épandage permettent de retrouver des valeurs correspondant aux apports, aux erreurs près d'épandage, de microtopographie et d'analyse.

2. *Évolution dans le temps*

a) *Azote ammoniacal.*

Cette forme n'a jamais été décelée à aucun niveau dans les parcelles ne recevant ni sel ammoniacal ni urée, sinon en quantités très réduites qui ont pu être négligées. Pratiquement, aussi bien dans les parcelles témoins que dans celles qui ont reçu un apport nitrique, l'intégralité de l'azote minéral présent dans le profil se trouve donc à tout moment sous forme nitrique à tous les niveaux. Dans les parcelles recevant un sel d'ammonium ou de l'urée, la disparition de la forme ammoniacale est totale et définitive, de un à deux mois après la date de l'apport.

b) *Azote nitrique.*

Les figures de 1 à 4 montrent l'évolution au cours du temps de l'azote nitrique présent dans le profil de 0 à 1 mètre pour chacune des quatre années de 1963 à 1966. On a porté en ordonnées les différences : azote nitrique de chaque parcelle traitée moins azote nitrique du témoin.

Les courbes en traits fins représentent l'évolution des quantités d'azote nitrique présentes dans l'ensemble du profil prospecté dès que la profondeur des prélèvements dépasse 100 cm, c'est-à-dire dès que l'azote nitrique provenant des apports d'azote commence à migrer au-delà de cette profondeur. La profondeur totale des prélèvements est indiquée en cm dans la partie supérieure des figures.

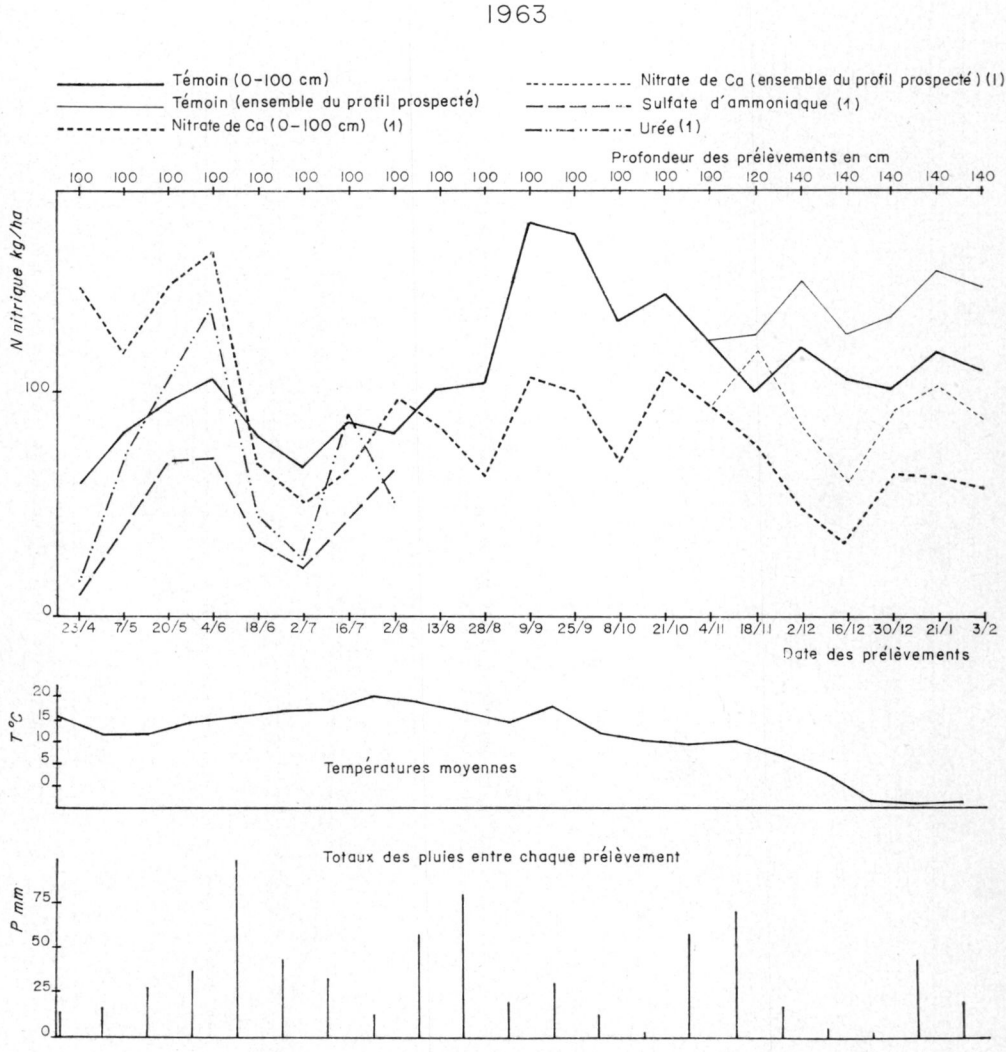


FIG. 1. — *1963.*

Évolution dans le temps de l'azote nitrique naturel ou résultant des apports minéraux

(1) les ordonnées représentent l'excès de N nitrique de ces parcelles sur le témoin

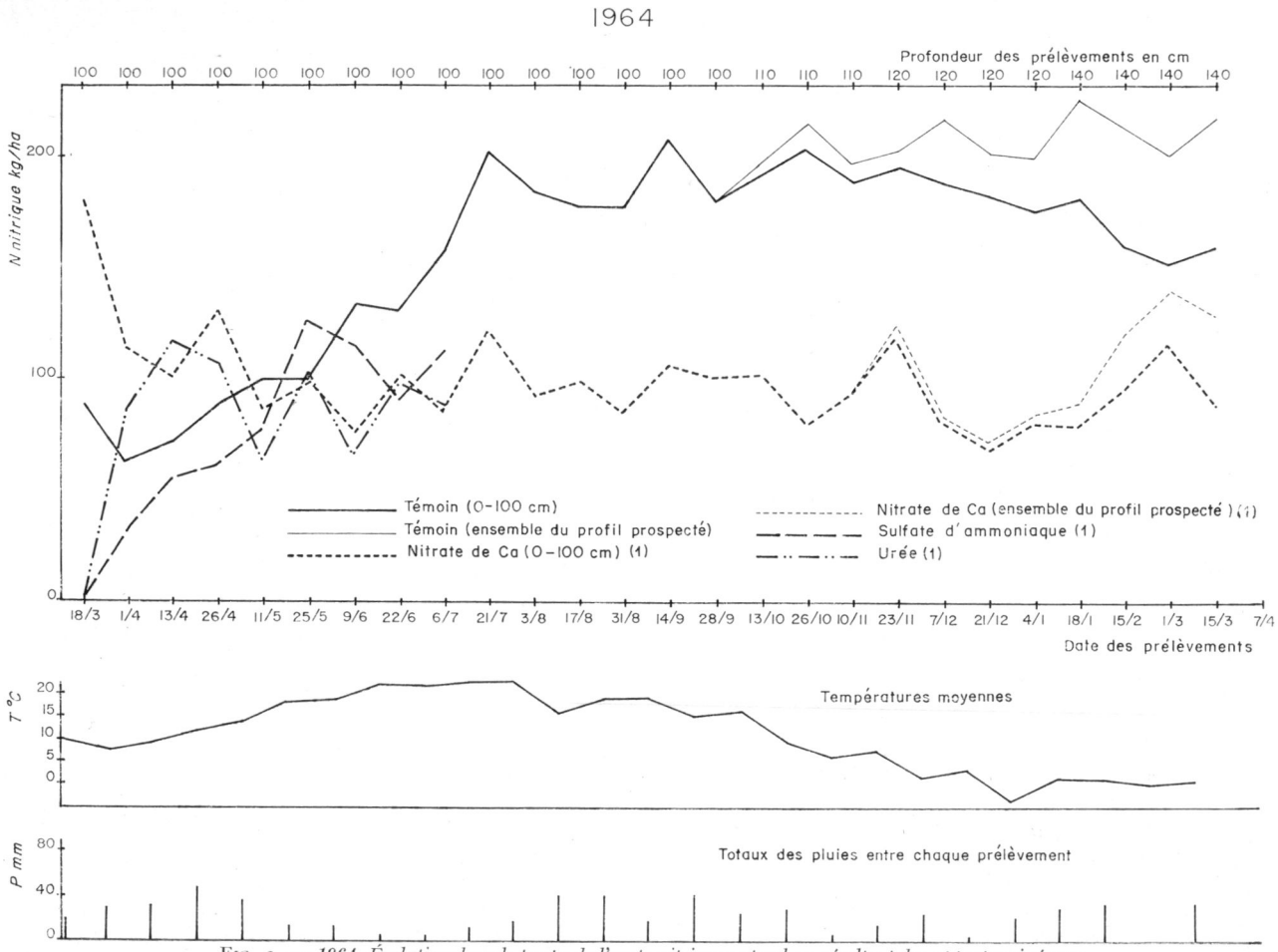


FIG. 2. — *1964. Évolution dans le temps de l'azote nitrique naturel ou résultant des apports minéraux*
(1) les ordonnées représentent l'excès de N nitrique de ces parcelles sur le témoin

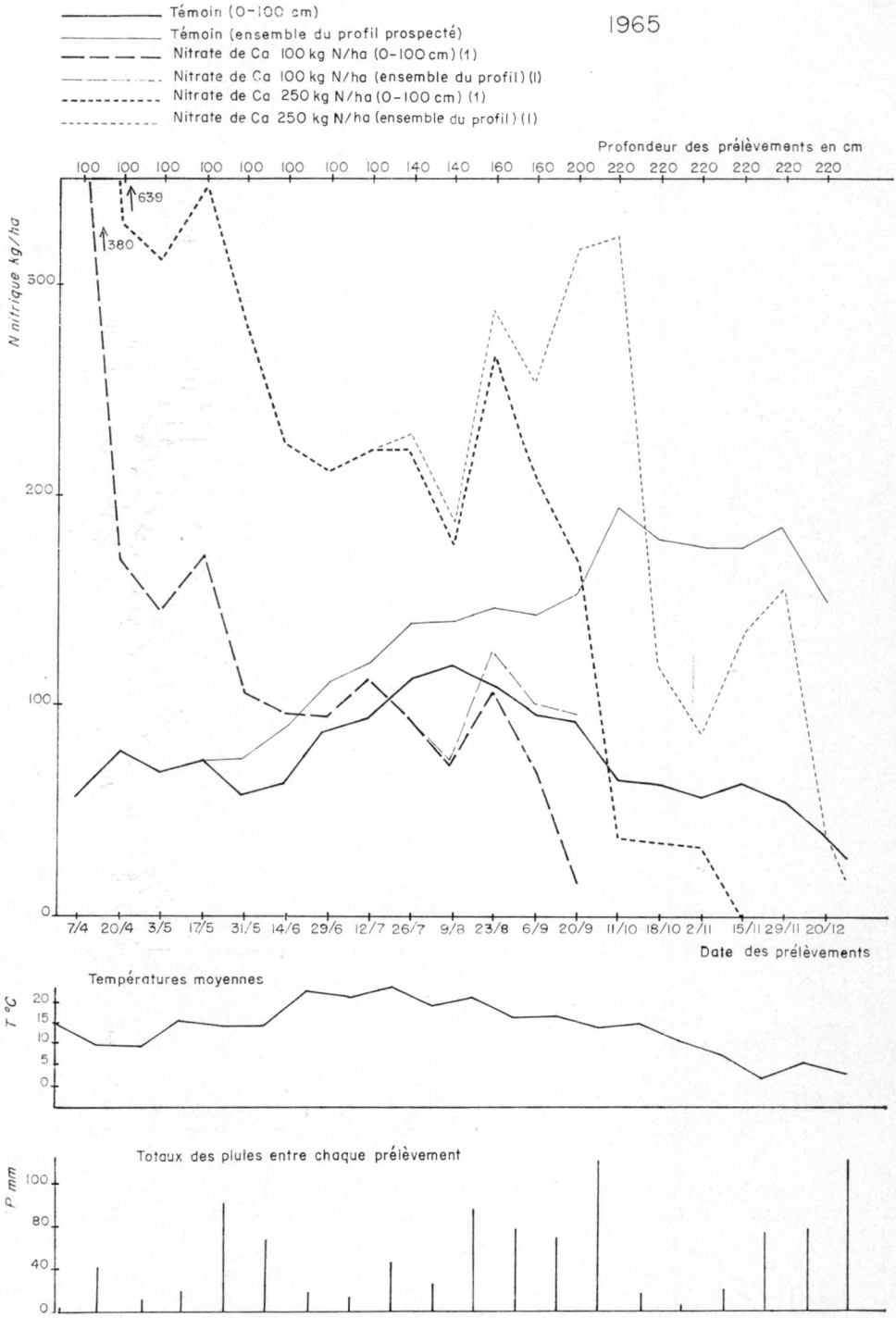


FIG. 3. — *1965.*

Évolution dans le temps de l'azote nitrique naturel ou résultant des apports minéraux

(1) les ordonnées représentent l'excès de N nitrique de ces parcelles sur le témoin

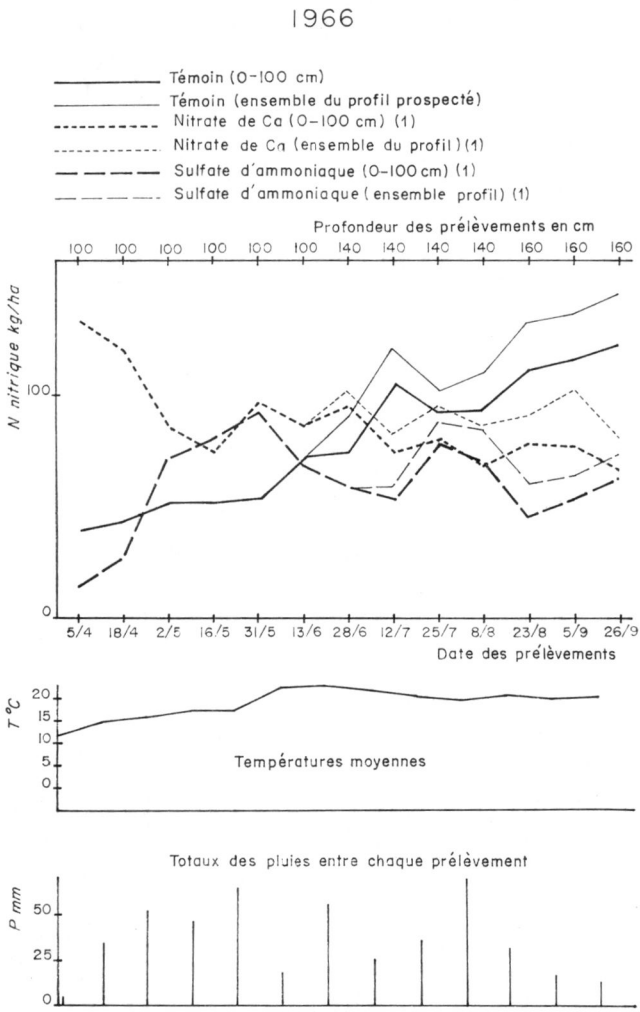


FIG. 4. — *1966*

Évolution dans le temps de l'azote nitrique naturel ou résultant des apports minéraux

(1) les ordonnées représentent l'excès de N nitrique de ces parcelles sur le témoin

3. *Profils nitriques*

La figure 5 montre la distribution de l'azote nitrique à l'intérieur du profil à différentes dates pendant la période s'étendant du 31 mai au 6 septembre 1965, dans une parcelle ayant reçu 250 kg d'azote nitrique le 30 mars 1965. L'axe des ordonnées représente les profondeurs en cm et l'axe des abscisses les quantités d'azote nitrique présentes en kg par ha dans chaque tranche de 20 cm de sol. Chacune des six figures représente les profils nitriques à deux dates espacées de 14 ou 28 jours, le profil en trait plein étant antérieur à celui tracé en pointillé. La courbe chevauchant l'axe des ordonnées représente pour chaque tranche de 20 cm de sol le bilan des gains (à droite) ou des pertes (à gauche) en kg d'azote nitrique par hectare entre chaque groupe de deux observations. Un déficit de l'azote nitrique dans une couche de sol peut être la conséquence d'une migration s'il s'accompagne d'un enrichissement dans une couche de niveau inférieur (décalage des sommets), ou bien si ce n'est pas le cas, ce déficit ne peut être que la conséquence soit d'une organisation, soit d'une perte d'azote à l'état gazeux.

4. *Migration et disparition de l'azote nitrique*

La figure 8 représente les profils nitriques obtenus durant la période du 20 septembre au 2 novembre 1965, au début de laquelle une série de précipitations totalisant 140 mm a entraîné un déplacement important en profondeur de l'azote nitrique. Une disparition assez massive en place de l'azote nitrique a succédé à ce déplacement, ainsi que l'atteste l'examen des profils nitriques successifs du 4 octobre au 2 novembre, montrant l'abaissement du taux d'azote nitrique présent dans le sol, sans déplacement en profondeur du sommet des courbes.

DISCUSSION

1. *Évolution de l'azote nitrique dans le témoin*

En fin d'hiver, la quantité d'azote nitrique présente dans la tranche de sol comprise entre 0 et 100 cm oscille autour de 60 kg par hectare (fig. 1, 2 et 3). En 1966 cependant, l'importance de la pluviométrie automnale et hivernale a provoqué dans la tranche de sol de 0 à 100 cm un lessivage intense qui a été constaté dans les parcelles implantées en 1965 (fig. 3 et homologue non représenté de la figure 8). Ce lessivage a ramené la quantité d'azote nitrique dans cette tranche de sol à 20 kg/ha le 28 février.

Les prélèvements effectués après les minima observés en fin d'hiver montrent que la minéralisation des réserves organiques est activée dès le mois de mars ou le mois d'avril, en relation avec l'élévation des températures moyennes, et se poursuit au printemps avec quelques fluctuations, dont la plus marquée s'est manifestée en juin 1963 par une phase de réorganisation, bien mise en évidence par les séries de profils nitriques représentées par la figure 6. En effet, cette figure montre l'intervention :

1° d'un lessivage imputable surtout aux précipitations de la période du 4 au 18 juin. Ce lessivage est particulièrement visible dans les parcelles traitées (décalage des sommets des diagrammes) ;

2° d'une réorganisation déjà importante le 18 juin, atteignant son maximum d'intensité le 2 juillet (bilan déficitaire : une dénitrification est peu probable en l'es-

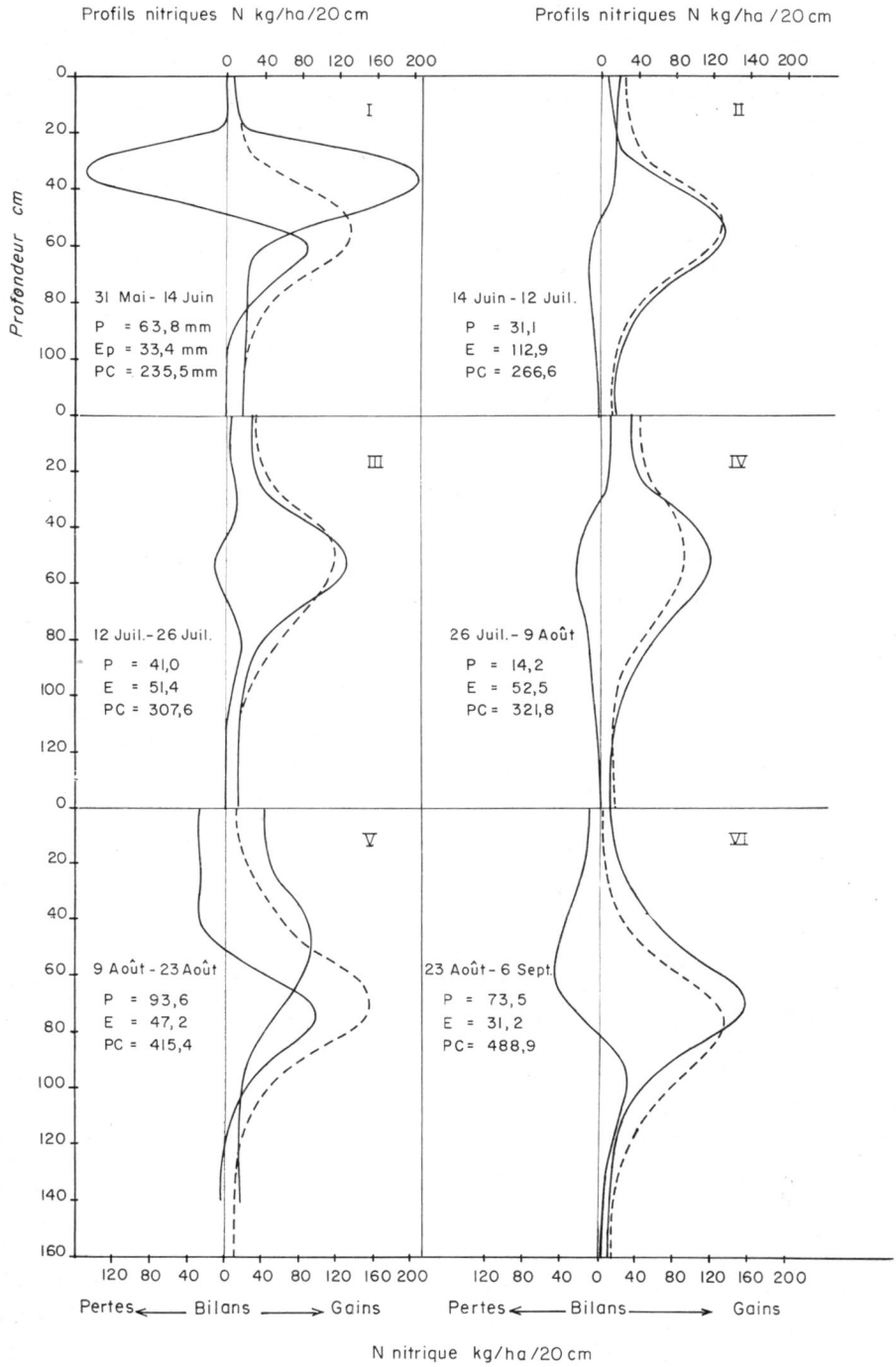


FIG. 5. — *Évolution des profils nitriques du 31-5 au 6-9-1965, dans une parcelle ayant reçu 250 kg/ha de N nitrique le 30-3-1965*

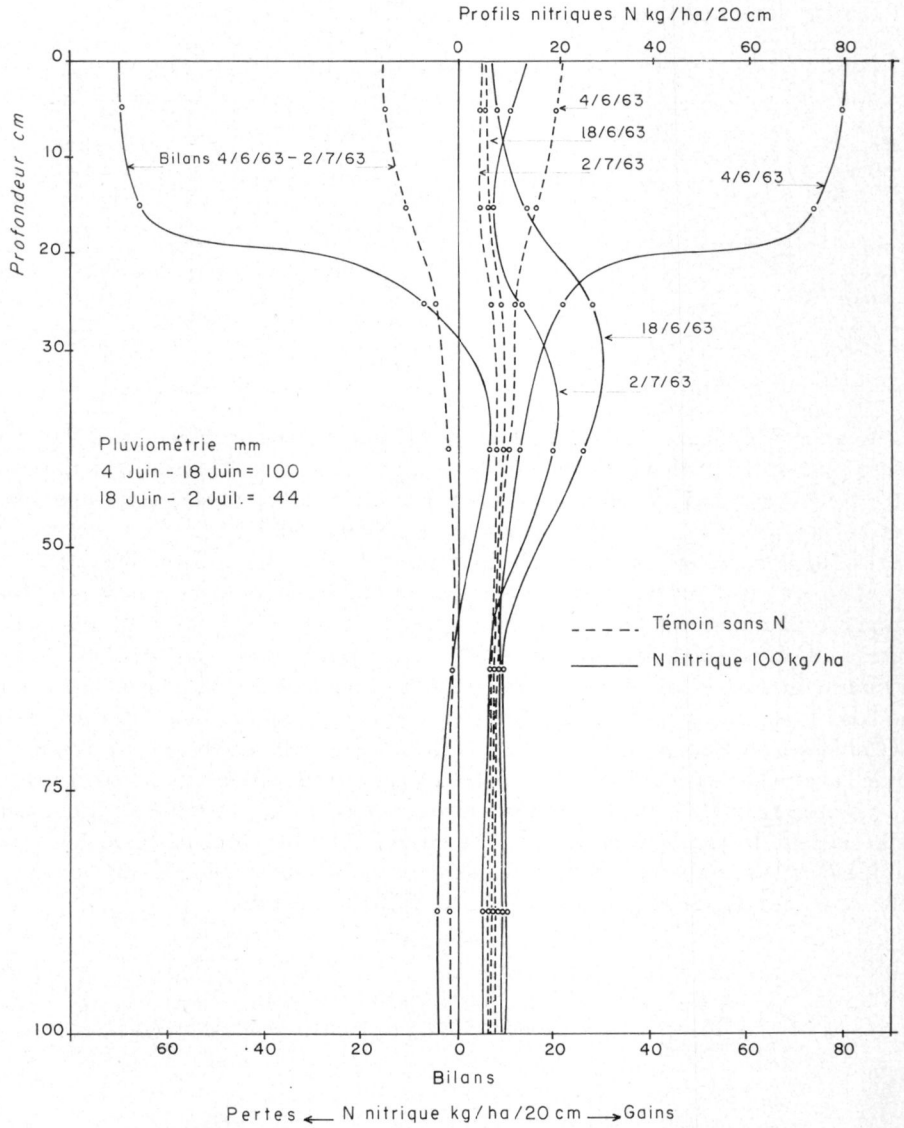


FIG. 6. — *Migration et organisation de l'azote nitrique dans une parcelle témoin, et dans une parcelle ayant reçu 100 kg/ha de N nitrique le 18-4-1963*

pèce). Il est intéressant de noter que cette réorganisation est intervenue à la suite de précipitations importantes ayant saturé le sol en eau pendant une courte période.

Les maxima annuels sont obtenus au mois d'août en 1965 et septembre pour les trois autres années, à des taux variables, atteignant pour la tranche de sol de 0 à 100 cm, les valeurs indiquées ci-après (tabl. 1).

TABLEAU I

Année	Minima		Maxima		Minéralisation nette apparente (N nitrique en kg/ha)
	Date	N nitrique (kg/ha)	Date	N nitrique (kg/ha)	
1963	23-4	58	9-9	176	118
1964	1-4	62	14-9	208	116
1965	7-4	56	9-8	118	62
1966	28-2	20	26-9	123	103

Les entraînements au-delà du niveau 100 cm d'une partie de l'azote nitrique préexistant ou nouvellement minéralisé masquent l'importance de la minéralisation nette réelle qui est en fait toujours supérieure à la minéralisation nette apparente, c'est-à-dire aux gains nets du sol pendant la période considérée.

On peut toutefois estimer l'azote nitrique lessivé au-dessous d'un mètre en tenant compte de l'importance des précipitations intervenues entre les dates d'observation du minimum et du maximum. Cet azote lessivé est celui qui se trouve dans la tranche de sol située dans la partie inférieure du profil au moment de l'observation du minimum. Son épaisseur est fonction de la pluviométrie. On peut évaluer, ainsi que nous le verrons plus loin, à 6 mm en moyenne la hauteur des pluies nécessaires pour abaisser de 1 cm le niveau de l'onde nitrique dans le sol étudié. L'épaisseur en cm de la tranche considérée est donc égale à la pluviométrie en mm divisée par 6.

Compte tenu de cette correction qui permet d'évaluer la minéralisation nette réelle, on peut déduire le taux annuel de libération de l'azote total du sol. Si l'on admet que le siège de la minéralisation active de ces réserves se limite à la couche superficielle de 0 à 40 cm du sol, nous obtenons les chiffres suivants :

Année	Estimation de la minéralisation nette réelle	Taux annuel de libération de N total du sol
1963.....	162	2,6
1964.....	192	3,0
1965.....	98	1,6
1966.....	125	2,0

Lorsque la pluviométrie est importante, une fraction de l'azote minéralisé postérieurement à la date de l'observation du minimum peut être lessivé au-dessous de 1 mètre, ce qui fut le cas pour l'année 1965, dont les chiffres ne peuvent être retenus.

Pour les trois autres années, le taux annuel de libération de l'azote du sol se montre très variable en fonction des conditions climatiques et ressort à 2 à 3 p. 100 des réserves totales.

L'examen des figures 1 à 4 montre qu'à partir des maxima de minéralisation observés, l'évolution de cet azote se poursuit assez différemment suivant les années, mais que les fluctuations enregistrées ne se révèlent jamais importantes ni brutales. En 1963 cependant, nous assistons à une phase de réorganisation progressive et de lessivage pendant la période du 9 septembre au 18 novembre, date à partir de laquelle une certaine stabilité est observée. Au cours de l'année 1964, une remarquable stabilité succède à la période de minéralisation active antérieure au mois d'août, l'appauvrissement modéré et régulier des couches superficielles à partir du mois de décembre étant imputable à la migration lente et progressive des nitrates au-delà du niveau 100 cm. Le lessivage provoqué par les pluies de la deuxième quinzaine de mars (54,6 mm) a ramené la valeur de l'azote minéral à 57 kg/ha dans la tranche de 0 à 100 cm, ce chiffre constituant le point le plus bas au départ de l'année 1965.

La migration est beaucoup plus intense au cours de l'année 1965, dont la pluviosité s'est montrée très excédentaire, ce qui a eu pour effet d'accuser la divergence des deux courbes représentant l'évolution de l'azote minéral dans le profil de 0 à 100 d'une part, et dans l'ensemble du profil prospecté d'autre part. La migration presque ininterrompue des nitrates dans les couches profondes a provoqué une chute assez constante de l'azote minéral dans la tranche 0-100 cm, jusqu'à une valeur voisine de 20 kg N/ha à la date du 28 février.

L'allure générale de l'évolution de l'azote minéral dans les parcelles ne recevant aucun apport azoté peut en conclusion se schématiser de façon très simple dans les conditions du milieu où ces expériences ont été réalisées. Elle présente une phase de minéralisation progressive d'avril à septembre suivie d'un palier se prolongeant au cours de l'automne et éventuellement de l'hiver, jusqu'à ce que les précipitations hivernales ramènent, par lessivage ou organisation, le taux d'azote minéral présent dans le sol à son point le plus bas au début de l'année suivante. Les phénomènes d'organisation jouent en perturbant de manière plus ou moins sensible cette évolution schématique, mais les fluctuations massives et brutales ne se montrent qu'assez exceptionnelles.

2. *Évolution des apports nitriques*

2. 1. *Effet de stimulation.*

L'apport d'azote nitrique au sol a toujours eu pour effet immédiat une stimulation de la minéralisation nette des réserves organiques du sol. En effet, l'azote minéral dosé quelques jours après les apports montre que les quantités présentes dans le sol à ce moment sont nettement supérieures à la somme de N du témoin et de N apporté (tabl. 2).

Le phénomène a été particulièrement marqué en 1965, année pour laquelle les températures furent relativement élevées au cours de la période considérée, et dont il est peut-être intéressant de noter qu'elle intervenait après une année particulièrement sèche. Il est remarquable de constater que cette stimulation se produit dans les couches superficielles du sol. Elle peut en effet se manifester nettement, même si pratiquement aucune pluie n'est intervenue depuis l'épandage.

Ce phénomène de stimulation de la minéralisation grâce à un apport nitrique avait déjà été observé dans un sol de colluvions silico-argileux au cours d'expériences effectuées à Maison-Carrée de 1956 à 1958, dans des parcelles jusqu'alors cultivées (céréales), n'ayant reçu qu'une fertilisation azotée nulle ou modérée depuis plusieurs années. De même, des effets de stimulation ont été observés en sol argileux humifère superficiel de la région dijonnaise, dans un essai de fertilisation azotée sur orge suivi de 1962 à 1966 (S. MÉRIAUX, A. LIBOIS et R GROSMAN, 1965). La surminéralisation fut marquée chaque année après les applications de fin d'hiver, sauf en 1964 où elle fut masquée par un lessivage partiel. L'azote minéral trouvé en excès, après les applications, a varié de 25 à 40 kg/ha suivant les années pour des apports de 60 à 70 kg N/ha, dont 50 p. 100 sous forme nitrique.

TABLEAU 2

Année	Dose appliquée en kg N/ha	Nombre de jours entre l'application et le dosage	N en excès	Climatologie entre l'épandage et le prélèvement	
				T moy.	Pluies
1963	300	5	45	10	0,0
1964	100	7	80	9	21,0
1965	100	8	278	14	0,2
1965	250	8	389	14	0,2
1966	100	5	34	12	4,6

Il ne semble pas qu'en l'espèce, cette stimulation mette en cause la minéralisation des réserves provenant de l'organisation d'apports minéraux antérieurs, ainsi que l'avaient primitivement suggéré CHABANNES, BARBIER et DRIARD (1964), hypothèse que ces mêmes auteurs ont d'ailleurs considérée ultérieurement comme inexacte, au moins partiellement. En effet, le sol a toujours porté une culture l'année précédant l'implantation du dispositif expérimental qui était déplacé tous les ans, chacune de ces cultures ayant reçu une fertilisation azotée nulle ou modérée. De plus, en sol nu, aéré, on note, ainsi que nous le verrons plus loin, que l'intégralité de l'azote minéral apporté se trouve éliminé des couches superficielles et moyennes du sol un an après l'apport, sous des conditions climatiques normales.

L'effet de stimulation paraît en relation avec l'importance de l'apport, ainsi qu'il ressort des résultats observés en 1965 pour des apports de 100 et 250 unités N/ha, ayant provoqué respectivement l'apparition d'excès s'élevant à 278 et 389 kg N/ha, 8 jours après les épandages en surface.

Pour les conditions de milieu dans lesquelles l'étude a été suivie, l'effet de stimulation s'est toujours montré rapide et assez éphémère. L'excès de N nitrique qui en est résulté a toujours disparu totalement de un à deux mois après le maximum observé. Cette surminéralisation n'a jamais influencé l'évolution apparente ultérieure de l'azote minéral, aussi bien en ce qui concerne l'azote minéral libéré par le sol que celui provenant des apports. En effet, que la stimulation ait été importante ou limitée, après la disparition de N surminéralisé, les profils nitriques de N apporté (N dosé moins N du témoin) présentent une configuration normale, tout se passant comme si l'effet de stimulation n'était pas intervenu.

Il y a lieu de noter que dans les conditions de milieu dans lesquelles ce travail a été réalisé, et avec la forme nitrique de l'azote appliqué, l'effet de stimulation obtenu à Dijon pour l'ensemble de nos essais diffère notablement des résultats obtenus par CHABANNES et BARBIER à la ferme de la Minière près de Versailles en 1965, où ces auteurs ont observé, avec un apport ammoniaco-nitrique, un développement beaucoup plus lent de l'effet de stimulation qui atteint son maximum plus de deux mois après l'apport, ainsi qu'une réduction plus lente de l'azote ainsi surminéralisé.

Cependant, quelles que soient son allure et son intensité, nous constatons que ce phénomène est susceptible de se produire dans des types de sols et sous des climats variés, et qu'il peut se manifester aussi bien dans un sol portant une couverture végétale qu'en sol nu.

Notons que la présence dans le sol d'une certaine quantité d'azote minéral résulte de deux processus inverses : la minéralisation et l'organisation. Il s'agit donc d'une minéralisation nette dont l'accroissement pendant la stimulation pourrait être, au moins partiellement, la conséquence d'une inhibition de l'organisation sous l'influence des apports minéraux. L'emploi d'azote 15 comme traceur aiderait sans doute à éclairer ce dernier point.

Enfin, il est intéressant de noter que l'application d'azote minéral (ammonitrate) à un sol est susceptible de stimuler la minéralisation du soufre, ainsi que cela a été constaté à la ferme de la Minière près de Versailles (SIMON-SYLVESTRE, CHABANNES et DRIARD, 1967).

2. 2. *Migration dans le sol.*

Rappelons que les apports de nitrate sont effectués sous forme solide à la surface du sol et ne sont suivis d'aucun travail susceptible de les incorporer dans les couches superficielles du sol. La pénétration de ces nitrates dans le sol grâce à l'infiltration des eaux météoriques est assimilable au déplacement d'une onde qui épouse la forme d'une courbe en cloche assez régulière, s'étalant de plus en plus largement dans le sens vertical à l'intérieur du profil. La figure 5 montre une série de profils nitriques (différences par rapport aux témoins) concernant une parcelle ayant reçu le 30 mars 1965 250 kg N/ha sous forme nitrique. Les prélèvements ont été faits à cinq époques espacées de 14 jours, correspondant à des pluviométries cumulées de 266, 307, 322, 415 et 489 mm depuis l'origine de l'apport.

La migration dans le profil de l'onde nitrique est comparable à l'élution d'un corps dissous à l'intérieur d'une colonne chromatographique hétérogène, cette hétérogénéité tendant à étaler plus ou moins largement le pic dans le sens vertical. Les phénomènes d'organisation et de minéralisation de l'azote jouent en accusant l'étalement du pic. De plus, le passage d'un niveau présentant une certaine capacité de rétention pour l'eau à un niveau de capacité plus élevé tend à réduire l'étalement et à accroître l'amplitude du pic et inversement. Ceci est bien mis en évidence dans la figure 5 où le niveau de 60 à 80 cm présente une capacité de rétention pour l'eau plus élevée que les niveaux voisins. Dans le cas où une période se présente avec une succession de fluctuations modérées de dessiccations et de réhumectations, cette alternance a pour effet d'étaler la courbe, éventuellement sans modifier la position de son sommet dans le sens vertical, ainsi que cela s'est produit durant la période du 12 au 26 juillet 1965 (P = 41,0 mm — E Piche brut = 51,4 mm, fig. 5).

2. 3. *Vitesse de migration.*

La vitesse de migration de l'onde nitrique peut être appréciée grâce à l'artifice de la différence avec le témoin, qui permet de situer, avec une approximation suffisante, le sommet de la courbe de répartition. La migration de N nitrique en fonction de la pluviométrie varie assez largement suivant l'importance de l'évaporation, qui conditionne les infiltrations réelles. L'évaporation dépend elle-même du rythme des précipitations (entretien de l'humidité superficielle du sol à un taux élevé pendant des temps plus ou moins longs), ainsi que de la température, de l'hygrométrie et de la turbulence atmosphérique au niveau du sol. La migration varie également en fonction de la capacité de rétention pour l'eau des couches traversées. Néanmoins, l'ensemble de nos observations permet d'estimer à 5 à 7 mm la hauteur des précipitations nécessaires pour abaisser le niveau moyen de l'onde de 1 cm à l'intérieur du profil, dans nos conditions de milieu, avec des valeurs extrêmes atteignant exceptionnellement 4 et 8 mm.

2. 4. *Influence de la dose d'azote appliquée sur la vitesse de migration.*

Les quatre profils nitriques intéressant la période du 9 août au 20 septembre 1965 de chacune des deux parcelles ayant reçu respectivement 100 et 250 kg d'azote nitrique par ha le 30 mars précédent, sont mis en comparaison dans la figure 7. Les profils nitriques de la parcelle 100 kg N/ha ont été tracés à la même échelle que ceux de la parcelle 250 kg N/ha, en multipliant l'azote nitrique correspondant aux différences avec chaque témoin, dans chaque tranche de 20 cm de sol, par le facteur 2,5 ; chaque point du diagramme représente $2{,}5\ \Delta t + t$. Cet artifice permet de comparer les vitesses de migration des ions nitriques dans les deux catégories de parcelles, et de constater que la dose la plus faible d'azote nitrique migre plus rapidement que la dose la plus élevée. A l'exception du prélèvement du 23 août, ces écarts entre les distances de la surface du sol aux sommets des deux courbes moyennes sont significativement différents à partir du 9 août, les sommets se situant alors entre 50 et 60 cm de profondeur. L'écart maximum est évalué à 20 cm environ, les maxima des profils nitriques se situant entre 90 et 110 cm de profondeur, le 20 septembre, date à partir de laquelle les prélèvements dans la parcelle 100 kg N/ha ont dû être abandonnés. La vitesse moyenne de migration de la parcelle 100 kg N/ha ressort comme étant supérieure de près de 22 p. 100 à celle de la parcelle 250 kg N/ha.

Il ressort de ces observations que les pertes par lessivage ne sont proportionnellement pas plus à craindre lorsque l'on accroît la dose d'engrais azoté. Notons, toutefois, que ces résultats n'ont pu être reproduits de façon significative au cours d'une expérience ultérieure en raison de l'hétérogénéité rencontrée, et qu'ils demanderaient à être confirmés dans d'autres conditions de milieu.

2. 5. *Organisation.*

L'examen des courbes annuelles d'évolution globale permet de constater qu'après la disparition de l'effet de stimulation, les différences trouvées dans les valeurs de l'azote minéral entre les parcelles 1 (témoin) et 2 (100 kg N nitrique/ha) tendent à évoluer autour de 100 kg par hectare, valeur correspondant à la dose d'azote nitrique apportée. Nous retrouvons après dix mois en 1963 et 1964, et jusqu'à la fin des mesures en 1966, sur l'ensemble du profil prospecté, la totalité de l'azote appliqué. Cependant, les courbes d'évolution présentent de nombreuses fluctuations d'ampli-

tude variable, suggérant une succession de phénomènes d'organisation et de minéralisation. L'analyse statistique des résultats montre que l'amplitude des fluctuations les plus accusées n'est significative qu'à des seuils de probabilité variant de 50 à 95 p. 100. Quelques-unes de ces fluctuations ne semblent donc pas fortuites, mais la plupart d'entre elles peuvent être imputées à l'hétérogénéité du sol ainsi qu'aux erreurs d'échantillonnage et d analyse Il est possible d'ailleurs que l'organisation et la minéralisation constituent deux phénomènes simultanés, l'un ou l'autre de ces phénomènes s'extériorisant en raison de sa prépondérance à un moment donné. En sol bien aéré, l'équilibre tendrait vers l'oxydation et les phénomènes d'organisation ne joueraient alors qu'un rôle secondaire. Il peut être intéressant de souligner qu'il n'a jamais été noté d' « effet tampon » du sol vis-à-vis de l'azote minéral dans nos conditions de milieu, contrairement aux observations faites par HÉBERT et LEFÈVRE (1965) dans différents types de sols où ces auteurs, suivant l'évolution de N minéral

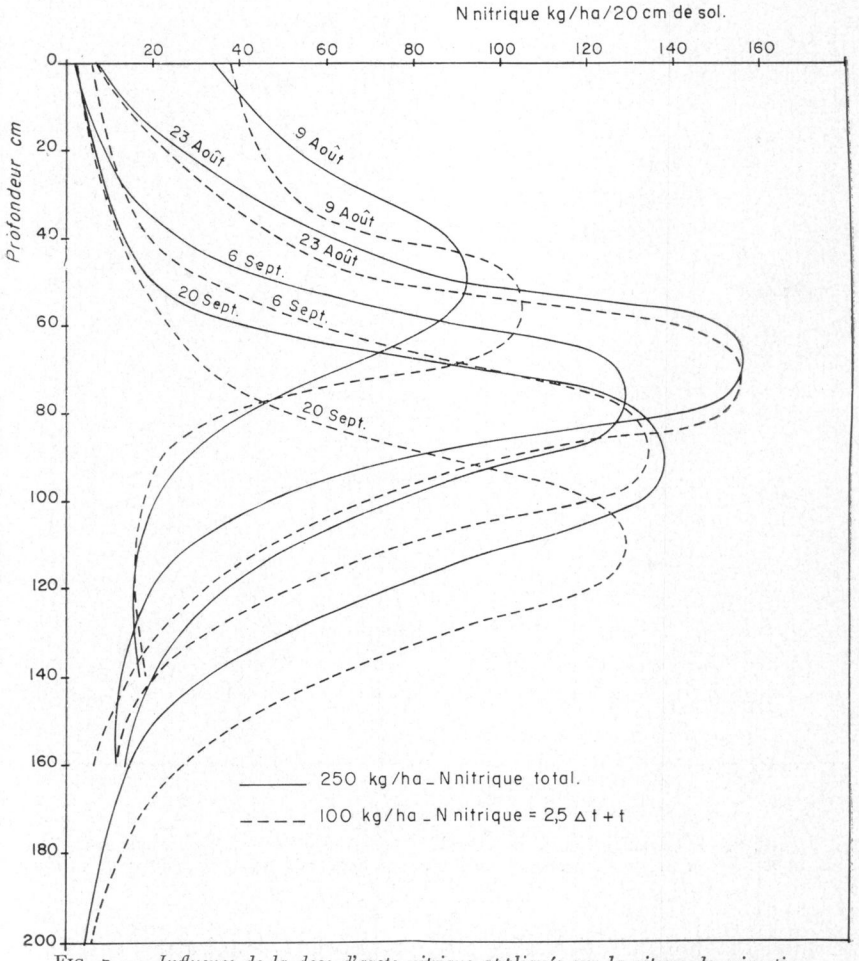


FIG. 7. — *Influence de la dose d'azote nitrique appliquée sur la vitesse de migration*
Les diagrammes correspondant à la dose 100 kg N/ha ont été ramenés à la même échelle que ceux de la dose 250 kg N/ha, pour faciliter la comparaison

dans des parcelles nues ayant ou non reçu un engrais azoté, ont émis l'hypothèse que le sol réagirait contre un excès de N minéral en organisant cet azote jusqu'à un seuil

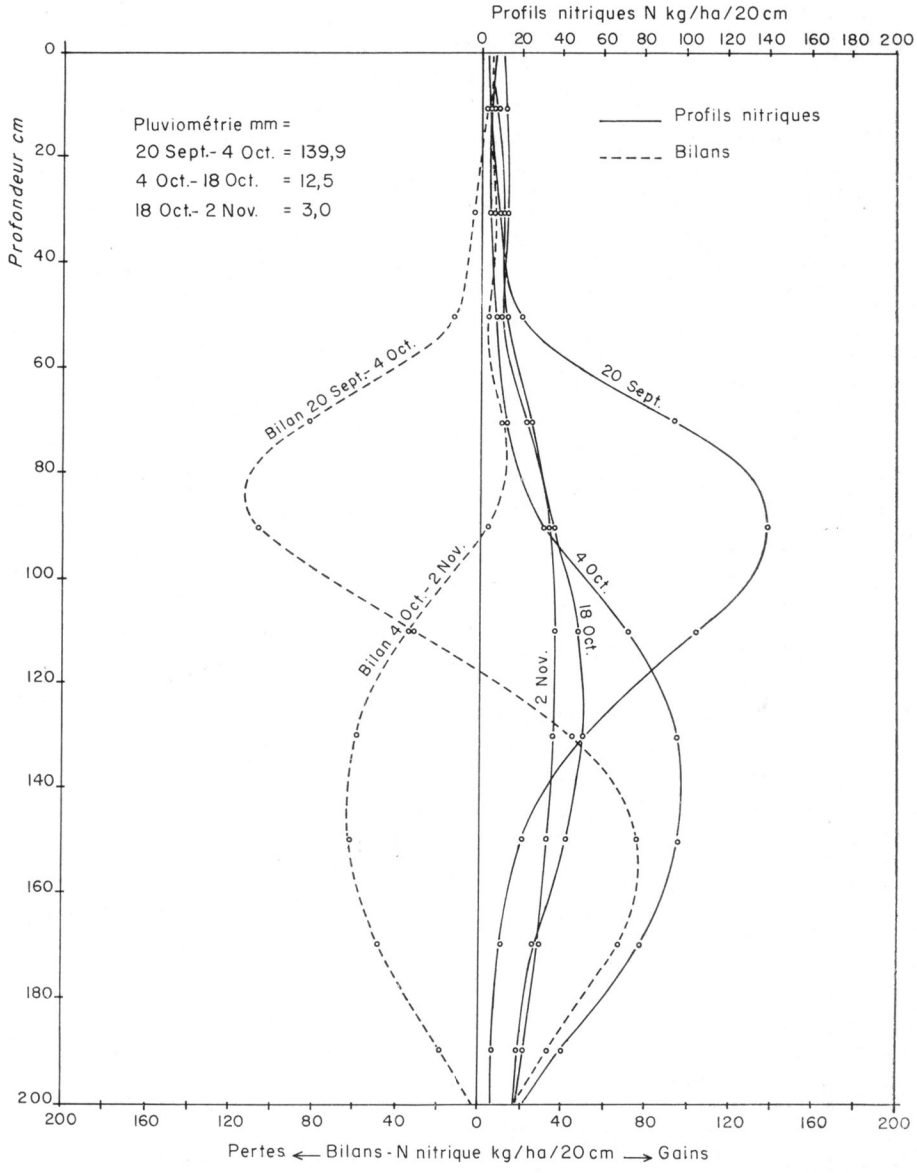


FIG. 8. — *Migration limitée et disparition partielle en place de l'azote nitrique sans apparition de la forme ammoniacale, dans une parcelle ayant reçu 250 kg/ha de N nitrique le 30-3-1965*

en deçà duquel la minéralisation reprendrait le pas sur l'organisation, entraînant des fluctuations brutales et de forte amplitude. De plus, à la longue, l'azote ajouté tendrait à être organisé progressivement et définitivement au cours de l'année dans les

couches superficielles et moyennes du sol. Or, sous nos conditions, ainsi que nous l'avons vu, il est possible de retrouver dans le profil, sous forme nitrique, l'intégralité de l'azote apporté, un an après son application, à condition de prospecter jusque dans les couches profondes, où l'azote minéral se trouve entraîné, surtout à l'issue d'une année pluvieuse.

Les phénomènes d'organisation de grande amplitude semblent se produire surtout lorsque le sol se trouve placé au-delà de sa capacité de rétention pendant une période suffisamment prolongée. Ce processus a été observé fin juin, début juillet 1963, où une organisation assez importante est intervenue après une série de précipitations rapprochées totalisant 100 mm en une huitaine de jours. Après ressuyage du terrain, la minéralisation a remonté N nitrique à un taux correspondant à la dose appliquée.

En 1965, des chutes de pluie totalisant 140 mm en quelques jours ont saturé le terrain en eau et ont provoqué une migration limitée de l'azote nitrique vers les couches profondes du sol. Cette migration a été suivie de la disparition en place d'une fraction importante de l'azote nitrique, au cours d'une période d'un mois se situant

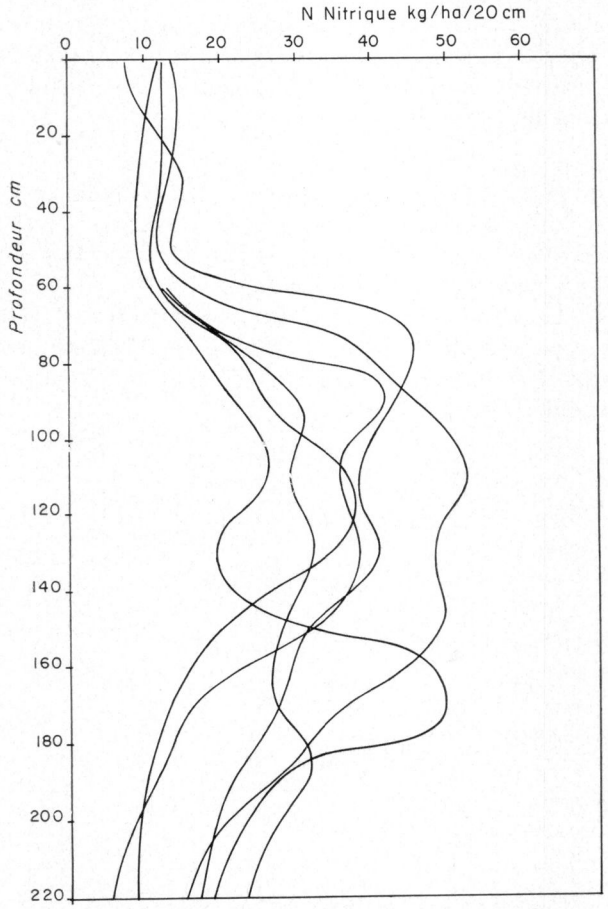


FIG. 9. — *Hétérogénéité de la répartition de l'azote nitrique*
Les six diagrammes représentent chacune des six répétitions du prélèvement du 2-11-1965, dans la parcelle n° 3 (application de 250 kg/ha N nitrique le 30-3-1965)

entre le 18e et le 40e jour après la saturation en eau du terrain (fig. 8). Cette disparition définitive de plus de 200 kg d'azote minéral par hectare s'est produite à une profondeur moyenne de 1,40 m alors que la courbe de répartition était largement étalée dans le profil entre 0,80 et plus de 2 m de profondeur, dans des régions du sol où la teneur réduite en éléments hydrocarbonés rend difficile la possibilité d'une organisation. L'azote disparu n'ayant pas été retrouvé à ces niveaux sous forme minéralisable, l'hypothèse d'une dénitrification n'est pas rejetable *a priori*. Par ailleurs, la forme ammoniacale n'ayant jamais été décelée au cours de cette transformation, la possibilité d'une fixation sous cette forme paraît peu probable dans ces couches de sol, qui présentent en outre un taux limité d'éléments argileux.

Il est intéressant de souligner que lorsqu'une disparition de l'azote minéral *in situ* est observé dans le sol, surtout lorsque le phénomène revêt une grande amplitude, cette disparition a lieu de façon hétérogène, ce qui tend à accroître considérablement l'écart-type. En particulier, lors de la disparition importante observée consécutivement aux précipitations de fin septembre 1965, les profils nitriques de chaque prélèvement parcellaire sont extrêmement déformés et se chevauchent en tous sens au cours d'un même prélèvement, ainsi que le montre la figure 9, représentant les profils nitriques de six répétitions de la parcelle 3 (250 kg N/ha) du prélèvement du 2 novembre 1966 qui mettent en évidence la très grande hétérogénéité de la répartition verticale et horizontale de l'azote nitrique.

3. *Évolution des formes ammoniacales et amidiques*

Les formes ammoniacales (sulfate d'ammoniaque) et amidiques (urée) sont également apportées en surface et sans enfouissement.

Dans les parcelles 3, qui ont reçu en 1963, 1964 et 1966 100 kg N/ha sous forme ammoniacale, la disparition de cette forme est totale et définitive deux mois environ après les épandages. L'évolution sur l'ensemble du profil fut la suivante (différences par rapport aux témoins en kg N/ha) :

TABLEAU 3

1963 (apport le 18-4)

Date	23-4	7-5	20-5	4-6	18-6
N ammoniacal.....	81,6	46,6	23,2	16,0	1,0
N nitrique.....	8,7	39,3	68,8	71,5	32,1

1964 (apport le 11-3)

Date	18-3	1-4	13-4	26-4	11-5
N ammoniacal.....	101,8	94,1	40,8	11,8	0,0
N nitrique.....	1,3	30,2	54,9	61,9	76,6

TABLEAU 3 (suite)

1964 (apport le 23-3)

Date	5-4	18-4	2-5	16-5	31-5	13-6
N ammoniacal.....	91,1	79,7	31,8	16,5	5,1	0,0
N nitrique.....	13,7	26,9	71,7	78,7	94,1	70,6

Nous constatons qu'aucun effet de stimulation ne s'est manifesté, sinon très modérément en 1964 (1/4) en raison peut-être de la progressivité de la nitrification de N apporté, permettant sa réorganisation partielle au fur et à mesure de sa formation. Seule la forme nitrique de l'azote semble en effet susceptible de stimuler la minéralisation des réserves du sol.

Dans les parcelles 4, ayant reçu l'urée, la nitrification fut beaucoup plus rapide que dans le traitement ammoniacal (tabl. 4,) ainsi que cela avait été déjà montré par différents auteurs.

TABLEAU 4

1963 (apport le 18-4)

Date	*23-4*	*7-5*	*20-5*	*4-6*
N ammoniacal.....	0,0	38,3	20,9	6,8
N nitrique.....	12,7	69,7	161,9	134,1

1964 (apport le 11-9)

Date	*18-3*	*1-4*	*13-4*	*26-4*
N ammoniacal.....	0,0	44,9	5,6	0,0
N nitrique.....	0,0	84,4	116,5	107,5

Un effet de stimulation de la minéralisation des réserves organiques s'est manifesté nettement en 1963 par la présence d'un excès d'N minéral de 80 kg N/ha le 20 mai, probablement du fait de l'enrichissement rapide du sol en azote nitrique provenant de l'urée. Une organisation intense s'est produite pendant la période du 4 au 18 juin, parallèlement au phénomène général de même tendance enregistré dans les autres traitements, consécutivement aux précipitations importantes de cette période.

A partir de la fin de la nitrification des apports ammoniacaux et amidiques, le nombre de répétitions a dû être limité à deux, en raison de la multiplicité des prélèvements, ce qui réduit considérablement l'intérêt des courbes d'évolution, que nous n'avons pas de ce fait prolongées sur les figures.

CONCLUSION

Si l'on se borne à n'envisager que les grandes lignes qui se dégagent de cette étude, les faits observés peuvent se résumer comme suit.

1. *Parcelles témoins*

En parcelles nues ne recevant aucun apport azoté, l'évolution de l'azote minéral se présente en apparence de façon simple dans ce sol profond, bien structuré et sain, reposant sur un sous-sol perméable, ne s'engorgeant qu'à l'occasion de précipitations exceptionnelles.

L'évolution annuelle présente un minimum d'azote nitrique (la forme ammoniacale étant à tout moment pratiquement absente) en fin d'hiver, suivi d'une phase de minéralisation progressive aboutissant à un maximum qui se situe en fin d'été ou en début d'automne. Après l'observation de ce maximum, l'évolution de l'azote stocké dans les couches superficielles (0 à 100 cm) dépend de la pluviométrie automnale et hivernale qui, par suite du lessivage vers les couches profondes, ou de tout autre phénomène provoquant la disparition d'une fraction de l'azote minéral en place, ramène le taux de cet azote à son point le plus bas de l'année suivante, au plus tard en fin d'hiver. Lorsque la pluviométrie d'automne et d'hiver est limitée, le taux de N nitrique présente, après l'époque du maximum, un palier qui peut se prolonger tardivement au cours de l'hiver. Les phénomènes d'organisation et les fluctuations brutales ne se présentent qu'exceptionnellement en l'espèce.

2. *Parcelles traitées*

Dans les parcelles nues ayant reçu un apport nitrique, les faits saillants ressortent ainsi :

1° une stimulation de la minéralisation nette se manifeste régulièrement après chaque apport nitrique, avec une intensité variable ;

2° l'effet de stimulation augmente avec la quantité d'azote nitrique appliquée ;

3° l'azote nitrique en excès provenant de la stimulation de la minéralisation des réserves organiques tend à disparaître assez rapidement, de un à deux mois après son apparition dans le sol ;

4° on n'a pas observé en l'espèce d'effet-tampon du sol à l'égard de N minéral ; il est remarquable que dans les années à pluviométrie non excessive, l'azote nitrique primitivement apporté en surface au début du printemps est pratiquement retrouvé à tout moment dans l'ensemble du profil, pendant une période pouvant se prolonger jusqu'à la fin de l'hiver suivant ;

5° une différence significative a été observée entre les vitesses de migration de deux doses différentes d'azote nitrique apportées au même moment et dans les mêmes conditions, la dose la plus forte ayant migré relativement moins vite.

Parmi les faits observés au cours de ces quatre années d'expériences, certains et tout particulièrement celui signalé en 3°, apparaissent aussi inexplicables qu'inat-

tendus. Et pourtant, nous nous trouvions placés dans des conditions expérimentales simplifiées du fait de la suppression de toute couverture végétale et de l'absence de tout apport organique.

De plus les résultats de ces essais diffèrent parfois notablement de ceux qui ont pu être obtenus ailleurs sous d'autres conditions de sol et de climat. Cette constatation souligne une fois de plus l'extrême complexité des problèmes liés à l'évolution de l'azote dans le sol, ainsi que l'étendue des recherches qui restent à poursuivre dans ce domaine. Comme en beaucoup d'autres domaines de la recherche scientifique, lorsque deux processus inverses ont lieu simultanément — en l'espèce la minéralisation et l'organisation de l'azote — l'emploi d'un traceur apparaît indispensable pour analyser les phénomènes.

Reçu pour publication en février 1968.

SUMMARY

DYNAMICS OF MINERAL NITROGEN IN BARE SOIL

The movement of the mineral nitrogen generated in the soil or brought in under the form of mineral fertilizers was observed during four years *in situ* in a bare plot of ground located in the Dijon area.

The moisture, ammonium and nitrate nitrogen contents were determined from routine samplings made at such a depth that the nitrate nitrogen resulting from the added nitrogen fertilizers could be observed at all times while migrating.

At no level was any significant accumulation of the ammonium form of nitrogen ever noted.

In the check plots, the development curves show a minimum at winter's end (20 to 60 kilogrammes of nitrate nitrogen per hectare in the soil layer from 0 to 100 centimetres). Mineralization is initiated in April and goes on with some fluctuations caused by immobilization and leaching. Yearly peaks occur in August and September, the nitrate nitrogen content ranging from 118 to 208 kilogrammes per hectare.

The peak having been recorded, the mineral nitrogen of the profile varies chiefly and dependently according the autumn and winter rainfall. When rainfall is heavy leaching and possibly the disappearance *in situ* of a fraction of the mineral nitrogen bring down the nitrogen content, more or less rapidly, to its lowest point, at winter's end at the latest. Conversely, should autumn and winter rainfall be light, a plateau is observed which may extend late into the winter.

In the plots fertilized with nitrate nitrogen, the following facts were pointed out :

I) Stimulation of net mineralization of the soil reserves, each time nitrate was supplied to the soil.The nitrate-nitrogen content, determined several days after bringing in the fertilizer was always definitely higher than the sum N of the check plot + added N ;

II) The excess of nitrate nitrogen arising from the increased mineralization vanishes from one to two months after its appearance in the soil ;

III) Apparently, the subsequent movement of the nitrate nitrogen following the addition of the fertilizers is unrelated to the soil nitrogen, since the graphs showing the differences between the treated and the check plots range closely with the amount of added nitrate nitrogen (fig. 1 to 4) ;

IV) The nitrate nitrogen spread over the surface migrates, after the rainfall, in form of a wave extending more or less extensively, and vertically within the profile. This wave-form conforms to a fairly even bell-shaped curve (fig. 5). The observations we made enabled us to estimate that the rainfall needed to decrease the mean level of the nitric wave by one centimetre amounts to from 5 to 7 millimetres within the profile, the extreme values being respectively 4 and 8 millimetres ;

V) The lower amounts of nitrate nitrogen migrated comparatively more than the higher ones.

ZUSAMMENFASSUNG

DYNAMIK DES MINERALISCHEN STICKSTOFFES IN UNBEWACHSENEM BODEN

Vier Jahre lang wurde die Evolution des Bodensstickstoffes oder des in Form von mineralischem Dünger zugebrachten Stickstoffes in einem unbewachsenen Boden des Dijon-Gebietes untersucht.

Die Feuchtigkeit, sowie der ammoniak- und salpetersaürehaltige Stickstoff wurden mittels periodischer Entnahmen im frischen Boden dosiert. Diese wurden aus einer genügenden Tiefe extrahiert, damit der aus der Zufuhr mineralischen Düngers entstehende salpetersäurehaltige Stickstoff im Laufe seiner Wanderung genau beobachtet werden konnte.

In keiner Ebene wurde eine merkliche Anhäufung des ammoniakhaltigen Stickstoffes festgestellt.

In den Testen weisen die Evolutionskurven ein Minimum am Ende des Winters auf (20 bis 60 kg/h salpetersäurehaltiger Stickstoff in der Bodenhöhe zwischen 0 bis 100 cm). Die Mineralisierung wird vom Monat April ab beschleunigt und mit einigen Schwankungen, die der Organisation und dem Auslaugen zuzuschreiben sind, fortgesetzt. Die jährlichen Höchstbeträge werden für den salpetersäuerhaltigen Stickstoff mit 118 bis 208 kg/h im August oder September erreicht.

Nach Erreichung des Maximums ändert sich der mineralische Stickstoff des Bodenprofiles besonders nach der Menge der herbstlichen und winterlichen Niederschläge. — Sind die Niederschläge beträchtlich, so wird durch das Auslaugen und gegebenenfalls durch das örtliche Verschwinden eines Teils des mineralischen Stickstoffes, der Wert dieses Stickstoffes auf seinen niedrigsten Jahreswert, spätestens gegen Ende des Winters, mehr oder weniger schnell herabgesetzt. — Sind dagegen die herbstlichen und winterlichen Niederschläge geringer, so erhält man ein Wertniveau, das bis in den Winter erhalten bleiben kann.

In den Parzellen mit Salpetersäurezufuhr, wurde folgendes festgestellt :

1° Anregung der reinen Mineralisierung der Bodenvorräte nach jeder Zufuhr von Nitrat. Bei Bestimmung des Salpeterstickstoffes nach der Zufuhr erwies sich sein Wert immer als wesentlich höher im Vergleich mit der Summe des N des Testes und des zugebrachten N. ;

2° Ein bis zwei Monate nach seiner Erscheinung im Boden verschwindet der aus der Stimulierung stammende Ueberschuss an Salpeterstickstoff völlig.

3° Es scheint, dass die aus den Zufuhren stammende weitere Evolution des Salpeterstickstoffes sich unabhängig von dem Bodenstickstoff vollzieht. In der Tat zeigen die Diagramme, die die Unterschiede zwischen den behandelten Parzellen und dem Test darstellen, Schwankungen in benachbarten Grenzen mit der Zufuhrdosis (Abbildung Darstellungen 1 bis 4).

4° Der auf der Bodenoberfläche verteilte Salpeterstickstoff wandert im Boden nach den Niederschlägen in Form einer Welle, die sich immer weiter im Innern des Profils senkrecht hinstreckt. Diese Welle nimmt eine regelmässige glockenförmige Form an (Abbildung Darstellung 5). An Hand unserer gesamten Beobachtungen lässt sich die Höhe der notwendigen Niederschläge zu 5 bis 7 mm schätzen, um das mittlere Niveau der Salpetersäurewelle um 1 cm im Profil zu senken. Grenzwerte erreichen ausnahmsweise 4 bis 8 mm.

5° Die schwächsten Salpeterstickstoffdosen wanderten relativ viel rascher als die höchsten Dosen.

РЕЗЮМЕ

Динамика минерального азота в незанятой почве.

А. ЛИБУА.

Автор проследил в течении четырех лет в незанятой почве района Дижона эволюцию минерального азота образовавшегося в почве, или принесенного в нее в форме минеральных удобрений.

Дозажи влажности, аммониакальной и нитратной форм азота были проведены в свежей почве благодаря периодическому взятию образцов до глубины достаточной для того чтобы иметь возможность следить за всеми миграциями нитратного азота происходящего из внесенных удобрений.

За все время опыта ни на одном из уровней не было отмечено заметного накопления аммониакальной формы азота.

В контрольных почвах, кривые эволюции указывают минимальные величины в конце зимы (20-60 килограммов нитратного азота на гектар в слое почвы от 0, до 100 см). Активация минерализации начинается в Апреле и проходит с небольшими изменениями, вызванными реорганизацией и вымыванием. Годичные максимумы достигаются в Августе и Сентябре и представляют величины от 118 до 208 кг. азота на гектар.

По достижении максимума, количества минерального азота в профиле изменяются, особенно под влиянием осенних и зимних дождей. При сильной дождливости, благодаря вымыванию, а иногда и исчезновению части минерального азота, количество его возвращается более или менее быстро, наипоздднее к концу зимы, к самому низкому годовому уровню. В случае-же ограниченного количества осенних и зимних осадков, кривая образует порог, который может продлиться до поздней зимы.

На делянках получивших нитратное удобрение были констатированы следующие факты :

1. Стимуляция отчетливой минерализации почвенных запасов после каждой нитратной подкормки. Общее количество нитратного азота дозированного несколько дней после подкормки всегда превышало сумму азота контрольной делянки и внесенного азота.

2. Излишек нитратного азота появившийся благодаря стимуляции полностью исчезает через месяц или два после его появления в почве.

3. Последующая эволюция нитратного азота подкормок протекает как-будто незасимо от почвенного азота. И действительно , диаграммы отображающие разницу между подкормленными и контрольными делянками, развиваются в границах приближающихся к дозам подкормок. (Графики 1-4).

4. Нитратный азот разбросанный на поверхности мигрирует в почву после дождей принимая форму волны распространяющейся все более и более широко в вертикальном направлении вглубь профиля. Волна эта принимает колоколовидую форму довольно регулярной кривой. (График 5) Подводя итоги проведенных наблюдений автор считает что необходимо 5-7 мм. осадков для понижения на 1 см. уровня нитратной волны в профиле. Крайние величины могут достичь в исключительных случаях 4 и 8 мм.

5. Слабые дозы нитратного азота мигрируют в почву относительно быстрее повышенных доз.

REMERCIEMENTS

Nous exprimons toute notre gratitude à M. G. Barbier pour les nombreux conseils qu'il nous a prodigués, et pour l'intérêt qu'il a bien voulu porter à ce travail.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Chabannes J., 1961. Arrière-effets cumulés des fumures azotées minérales sur le cycle annuel de l'azote minéral du sol. *C. R. Acad. Agric.*, **47**, 935-939.

Chabannes J., Barbier G., 1963. Stockage d'azote dans le sol sous forme minéralisable par application d'azote minéral. *C. R. Acad. Agric.*, **48**, 550-555.

CHABANNES J., BARBIER G., DRIARD J., 1964. Nouvelles observations sur la minéralisation de l'azote dans le sol au printemps. *C. R. Acad. Agric.*, **49**, 874-881.

CHABANNES J., BARBIER G., 1967. Stimulation de la minéralisation printanière de l'azote du sol par apport d'azote minéral. *C. R. Acad. Agric.*, **53**, 96-101.

COLLIER D., 1964. Évolution et dynamisme de l'azote minéral dans les sols argilo-calcaires de la Limagne. *C. R. Acad. Agric.*, **50**, 1231-1251.

HÉBERT J., LEFÈVRE G. et *al.*, 1965. Observations de la minéralisation de l'azote en sol nu. *C. R. Acad. Agric.*, **51**, 852-858.

LEFEVRE G., DROUINEAU G., 1951. Variations saisonnières de la teneur en azote minéral dans un sol calcaire soumis au climat méditerranéen. *Ann. agron.*, **2**, 1-11.

LIBOIS A., 1965. Étude de l'évolution de l'azote minéral dans un sol nu de la région dijonnaise. *C. R. Acad. Agric.*, **51**, 546-551.

MERIAUX S., LIBOIS A., GROSMAN R., 1965. Libération d'azote minéral et nutrition azotée de l'orge dans un sol humifère de la région de Dijon. *C. R. Acad. Agric.*, **51**, 552-558.

SIMON-SYLVESTRE G., CHABANNES J., DRIARD N., 1967. Influence des fumures azotées sur l'alimentation des cultures en soufre. *C. R. Acad. Agric.*, **53**, 691-697.

SOUBIES L., GADET R., MAURY P., 1952. Migration hivernale de l'azote nitrique dans un sol limoneux de la région toulousaine. *Ann. agron.*, **3**, 365-383.

Ann. agron., 1968, **19** (2), 129-152.

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DE L'INFLUENCE DE LA COMPOSITION GRANULOMÉTRIQUE DES TERRES SUR LEUR STABILITÉ STRUCTURALE

D. KHEYRABI et G. MONNIER

Laboratoire des Sols,
Centre national de Recherches agronomiques, 78 - Versailles
Institut national de la Recherche agronomique

SOMMAIRE

Il est montré expérimentalement que, si l'argile est le facteur déterminant de la cohésion à l'état humide et par là, de la stabilité structurale des terres, son efficacité est très différente suivant les caractéristiques granulométriques (taille moyenne et distribution) des particules qui lui sont associées. L'interprétation suggérée se situe au niveau des possibilités d'assemblage des différents constituants.

INTRODUCTION

La composition granulométrique du matériau constituant un sol ou une partie de sol est la donnée à laquelle on a le plus fréquemment recours lorsqu'on cherche à le caractériser du point de vue de son comportement physique. Un grand nombre de propriétés physiques des terres sont en effet liées à la répartition dimensionnelle de leurs constituants élémentaires. Ceux-ci interviennent par leurs caractéristiques propres et par les interactions qui se manifestent entre elles. La notion de texture recouvre la résultante de ces différentes influences. C'est ainsi que l'on parle de terres argileuses, sableuses ou limoneuses, suivant que c'est l'une ou l'autre fraction granulométrique dont l'action est manifestement prépondérante.

La généralité de l'intérêt présenté par ce concept est soulignée par l'emploi qu'en font aussi bien les ingénieurs du Génie civil pour classer les sols par rapport à des propriétés mécaniques, que les agriculteurs dont les dénominations de terre « franche », « lourde » ou « légère », recouvrent des qualifications texturales. Aussi, de nombreux chercheurs se sont-ils efforcés d'établir des relations entre la granulométrie, donnée analytique principale de la texture, et diverses caractéristiques mesurables de l'état physique d'un sol et de son comportement.

Parmi ces propriétés, la stabilité structurale, c'est-à-dire l'aptitude des fragments terreux à résister à la désagrégation par l'eau, traduit l'un des comportements du sol les plus importants d'un point de vue agronomique : il est en effet à la base de l'établissement des programmes de travail du sol et peut être, lorsqu'il est défavorable, à l'origine de nombreux accidents culturaux.

Un certain nombre de relations ont été proposées qui, obtenues par voie statistique, permettent de prévoir, dans certaines limites, la stabilité structurale des terres au vu des résultats de l'analyse granulométrique. (S. MÉRIAUX, 1958 ; G. MARTIN, 1958-1961 ; COMBEAU et coll., 1960).

Si ces différents travaux ont mis en évidence l'influence principale de tel ou tel constituant et en particulier, celle de l'argile, ils n'ont que rarement et partiellement (S. MÉRIAUX [1], 1958) pris en considération des critères de distribution granulométrique. En second lieu, par une telle approche on est conduit à confondre l'influence propre de la composition granulométrique et celle d'autres caractéristiques qui peuvent interférer avec elle (nature minéralogique, forme des constituants élémentaires... etc). Enfin, la méthode statistique ne permet pas lorsqu'elle est utilisée *a priori*, d'analyser le mécanisme de l'action envisagée et l'on se prive ainsi de toute possibilité d'extension des résultats à une propriété voisine ou à des sols pris hors de la gamme des échantillons étudiés.

Pour tenter de résoudre ces différentes difficultés, nous avons choisi une méthode expérimentale qui consiste à étudier des échantillons, artificiellement constitués à partir de matériaux déterminés appartenant aux différentes fractions granulométriques.

MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL ET MÉTHODE D'ÉTUDE

1. *Appréciation de la stabilité structurale*

Nous avons utilisé la méthode proposée par S. HÉNIN et G. MONNIER (1956) qui s'appuie sur la théorie de la dégradation structurale présentée par S. HÉNIN (1938).

Rappelons qu'il s'agit d'une série de tamisages à 200 μ effectués sous l'eau et dans des conditions standard (FÉODOROFF, 1960) sur des échantillons du sol étudié composés d'agglomérats séchés à l'air et d'une taille inférieure à 2 mm. Préalablement à leur mise au contact de l'eau, certaines prises d'essai sont humectées par divers liquides organiques dans le but d'apporter des nuances à l'action directe de l'eau sur la terre sèche. La mesure porte sur le taux des agrégats dits « stables » restés sur le tamis à l'issue de la manipulation.

En ce qui concerne le but que nous poursuivons, l'intérêt de ces « prétraitements » est double :

— en premier lieu, ils permettent d'obtenir une sensibilité supérieure et dans une gamme plus étendue que celle qui résulterait de la seule action directe de l'eau ; en particulier, un prétraitement à l'alcool éthylique et plus encore au dioxane permet de déceler de petites variations de comportement dans la zone des faibles stabilités ;

— mais le plus grand intérêt présenté par ces prétraitements est que certains d'entre eux autorisent une interprétation particulière concernant les facteurs responsables des variations de stabilité décelées. Le mécanisme de leur action (HÉNIN, 1938) permet en effet de penser, et cela a été montré expérimentalement (G. MONNIER, 1965), que l'imbibition préalable à l'alcool éthylique conduit à des résultats (Ag_a p. 100) dépendant essentiellement de la cohésion de la terre à l'état humide et de ses variations ; le résultat du test au benzène (Ag_b p. 100) étant lui principalement fonction de la mouillabilité du matériau à étudier. Quant au troisième tamisage de la méthode originale, effectuée à la suite de l'action directe de l'eau sur la terre sèche, il permet d'obtenir un taux d'agrégats stables dits « sans prétraitement » (Ag_e p. 100). Son interprétation isolée est dans le cas général moins simple que celle des deux prétraitements effectifs.

(1) Cet auteur a établi l'existence d'une corrélation entre la stabilité et le rapport argile/limon.

2. *Matériel expérimental*

Rappelons que dans un souci d'analyse nous avons choisi de limiter notre étude aux relations entre la stabilité structurale et la texture considérée seulement comme le reflet de la distribution dimensionnelle des constituants élémentaires du sol. Nous avons donc été conduits à opérer sur une série d'échantillons de composition granulométrique variable mais dont la nature minéralogique et la forme des particules soient les mêmes pour chaque classe de taille. Ces échantillons ont été artificiellement constitués à partir de mélanges en proportions variables de particules appartenant aux différentes classes granulométriques de l'échelle d'Atterberg modifiée.

a) *Choix et préparation des constituants élémentaires.*

Les particules d'un diamètre équivalent inférieur à 50 μ ont été extraites et séparées par décantations successives après dispersion par la méthode internationale d'un matériau limono-argileux prélevé dans l'horizon d'accumulation d'un sol de limon de Versailles (H. B.). La fraction argileuse après avoir été floculée et rendue monoionique Ca^{++} a été lavée et amenée par centrifugation à une humidité voisine de 130 p. 100. Elle a été utilisée sous cette forme pour la fabrication des échantillons artificiels. Les deux fractions limoneuses ont été lavées et séchées.

Quant aux sables fins et grossiers extraits par tamisage de sables de carrière représentant deux faciès de finesse différente des sables de Fontainebleau, leurs limites de taille ont été très légèrement resserrées aux deux extrémités de la classe de façon à éviter la présence de particules d'une taille voisine de 200 μ susceptibles d'entraîner des erreurs dans les tamisages sous l'eau effectués à cette ouverture de maille lors des tests de stabilité structurale.

Finalement, les fractions granulométriques à partir desquelles les échantillons ont été préparés présentent les caractéristiques rassemblées dans le tableau 1.

TABLEAU I

Caractéristiques granulométriques, morphologiques et minéralogiques des constituants élémentaires

Désignation des fractions	Taille	Morphologie	Constitution minéralogique
Argile (*a*)	0-2 μ		Illite, Montmorillonite, interstratifiés
Limon fin (*l*)	2-20 μ	arrondis*	Quartz
Limon grossier (L)	20-50 μ	arrondis*	Quartz
Sables fins (*s*)	63-160 μ	arrondis*	Quartz + rare muscovite
Sables grossiers (S)	280-1 500 μ	arrondis*	Quartz + rare feldspath et muscovite

* Il s'agit de la forme générale et non du détail de la surface des grains

b) *Préparation des échantillons.*

La fabrication d'échantillons artificiels pour des études de structure postule un choix préalable. La structure n'est en effet pas définie seulement par les éléments qui la constituent mais aussi par leur arrangement. Quant à la stabilité structurale, un de ses facteurs principaux, la cohésion des assemblages, est également affecté par la manière dont se fait la liaison entre les ciments et les sables et limons qu'ils associent. C'est ainsi que S. HÉNIN (1938) a montré que le malaxage d'une terre dans certaines conditions d'humidité modifiait la stabilité des agglomérats obtenus après séchage.

Pour limiter de telles causes de variations, nous avons cherché une technique de fabrication telle qu'un échantillon reconstitué à partir de ses fractions élémentaires présente la même stabilité que le matériau originel.

La condition préalable et évidente d'homogénéité du mélange est réalisée en malaxant les cons-

tituants en présence d'une quantité d'eau suffisante pour leur assurer une certaine mobilité mais non excessive, pour éviter un tri par sédimentation. Cette humidité optima appréciée par tâtonnement sur quelques échantillons est obtenue en multipliant par 1,9 l'humidité équivalente calculée par la formule de GRAS (1957) [1].

La durée du malaxage a été limitée à 15 mn pour limiter la dessiccation. La pâte obtenue a été ressuyée sur Buchner pendant 5 heures [2], puis séchée à l'étuve à 105° et forcée à travers un tamis à maille carrée de 2 mm d'ouverture de maille.

Le tableau 2 confirme que les comportements des échantillons ainsi préparés sont très proches de ceux d'échantillons naturels présentant des granulométries comparables.

TABLEAU 2

Comportement comparé d'échantillons naturels et artificiels de granulométrie très voisine

	Échantillons	Granulométrie	Agrégats vrais p. 100		
			Ag_a	Ag_b	Ag_e
N° 1	Sol naturel.....	$a_{13}l_{11}L_{47}s_{25}S_1$	0,5	0	0,5
	Sol artificiel.....	$a_{15}l_{10}(L + s)_{75}$	0,4	0	0,3
N° 2	Sol naturel.....	$a_{17}l_{15}(L + s)_{17}S_{50}$	16	4,6	7,0
	Sol artificiel.....	$a_{20}l_{15}(L + s)_{17}S_{47}$	16	1	8,0
N° 3	Sol naturel.....	$a_{28}l_{25}L_{44}s_{1,5}S_{0,5}$	22	2,0	6,0
	Sol artificiel.....	$a_{28}l_{25}L_{44}s_{1,5}S_{0,5}$	23	0	6,0
N° 4	Sol naturel.....	$a_{41}l_{15}L_9s_{25}S_{11}$	37	1,5	19
	Sol artificiel.....	$a_{40}l_{15}(L + s)_{35}S_{10}$	38	0	24

Seuls les taux d'agrégats stables après prétraitement au benzène sont parfois différents en raison de la présence de matières organiques dans les terres de référence.

ÉTUDE DES MÉLANGES BINAIRES

Une étude systématique de mélanges contenant les cinq fractions granulométriques, abordée sans idée directrice, nécessiterait l'examen d'un nombre d'échantillons excessif. De plus, l'interprétation des résultats serait nécessairement globale : elle devrait se borner à la mise en évidence de l'influence de telle ou telle fraction selon qu'elle est associée à telle ou telle combinaison de constituants complémentaires.

Aussi avons-nous d'abord étudié le comportement de « mélanges binaires » constitués par des doses croissantes d'argile associé à chacune des fractions du squelette :

le limon fin (série des mélanges *a l*)
le limon grossier (série des mélanges *a* L)
le sable fin (série des mélanges *a* s)
le sable grossier (série des mélanges *a* S)

[1] He = 0,59 *a* p. 100 + 0,16 l p. 100 + 5,47.

[2] Le temps de ce ressuyage s'est avéré, lorsqu'il était inférieur à 4 heures, capable d'influer légèrement sur le comportement de l'échantillon obtenu.

Les teneurs en argile variant de 10 en 10 p. 100, il était donc possible pour chacune des séries de mettre en évidence dans ses grandes lignes le rôle de quantités croissantes d'argile ; d'autre part, pour une teneur donnée en argile, on pouvait comparer l'influence de la fraction granulométrique complémentaire.

A. — *Les résultats des tests de stabilité structurale*

Pour limiter les erreurs d'échantillonnage et accroître la sensibilité de la méthode, les tests ont été, sauf cas particuliers, effectués sur des agglomérats grossiers compris entre 1 et 2 mm. Les résultats (notés Ag_i p. 100) expriment le taux de particules restées sur le tamis, diminué du taux de sable grossier de l'échantillon traité : il s'agit donc « d'agrégats vrais ». Ceux-ci ont été obtenus pour chaque cas à l'issue de 4 tamisages l'un après prétraitement à l'alcool éthylique (Ag_a p. 100), un autre après prétraitement au dioxane (Ag_d p. 100), un troisième après prétraitement au benzène (Ag_b p. 100), un quatrième enfin après action directe de l'eau sur la terre sèche (Ag_e p. 100).

1. *Agrégats stables après prétraitement au benzène.*

Tous les échantillons présentent un taux Ag_b p. 100 nul. Ce résultat obtenu en l'absence de toute matière organique et pour une argile Ca^{++} n'est pas surprenant : il montre que la mouillabilité de tous les mélanges est assez élevée pour ne pas intervenir d'une façon sensible aux tests utilisés et même au plus spécifique d'entre eux. Cette conclusion permettra de simplifier l'interprétation des autres résultats : les différents tests mettront principalement en évidence des effets « cohésion ». Aussi pourrons-nous nous baser sur le taux d'agrégats stables sans prétraitement obtenu à la suite de l'action de l'eau la plus énergique ; les taux Ag_a et Ag_d fournissant des éléments d'interprétation plus nuancée à certains niveaux.

2. *Agrégats stables sans prétraitement.*

La figure 1 représente les variations de stabilité (Ag_e p. 100) des différentes séries en fonction de la teneur en argile.

On peut tout d'abord faire des constatations valables pour toutes les séries :

— la stabilité croît avec la teneur en argile ; toutefois cette relation n'est pas linéaire : les courbes ont une forme générale en S et présentent un maximum ;

— les faibles doses d'argile sont le plus souvent incapables de provoquer l'apparition d'une stabilité décelable par le test utilisé ;

— la stabilité *mesurée* maximum est atteinte pour des taux d'argile inférieurs à 100 p. 100 : on note une certaine baisse de stabilité vers les très fortes teneurs en argile.

D'une série à l'autre apparaissent des différences de comportement qui portent :

— sur la teneur en argile pour laquelle la stabilité apparaît ($Ag_e \geqslant 2$ p. 100) ;

— sur les coordonnées des maxima des courbes de stabilité ;

— sur l'efficacité de l'argile qui s'avère d'autant plus faible que le squelette qui lui est associé est plus grossier ;

— sur la stabilité de la série *a*S qui fait exception à cette règle pour les moins fortes teneurs en argile.

La conclusion générale de cette comparaison est que les mélanges à base de limon grossier et de sables fins ont pour chaque teneur en argile des comportements très voisins qui les opposent d'une part à ceux de la série *al*, d'autre part à ceux de la série *a*S.

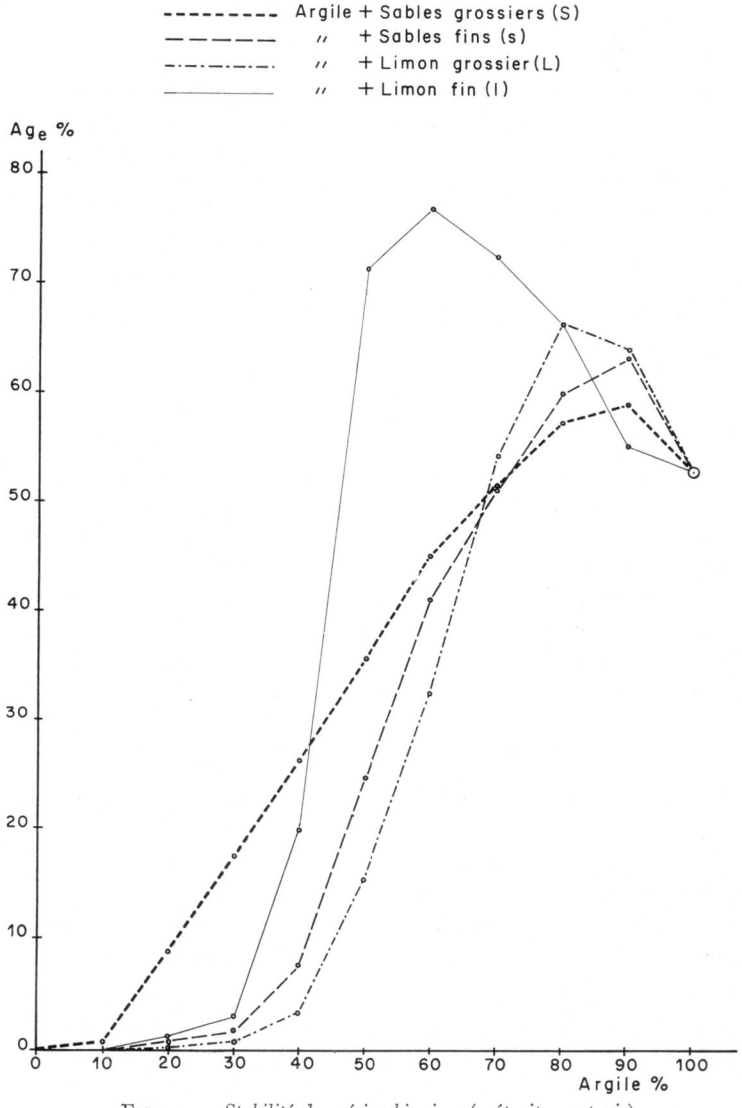


FIG. 1. — *Stabilité des séries binaires* (prétraitement air)

3. *Agrégats stables après prétraitement à l'alcool.*

Les figures 2 et 3 rassemblent les résultats obtenus.

On constate que si l'allure générale des variations de stabilité reste la même qu'elle soit exprimée en Ag_a p. 100, $Ag_{\acute{a}}$ p. 100 ou Ag_e p. 100, l'effet protecteur des prétraitements est très différent suivant les séries et les teneurs en argile.

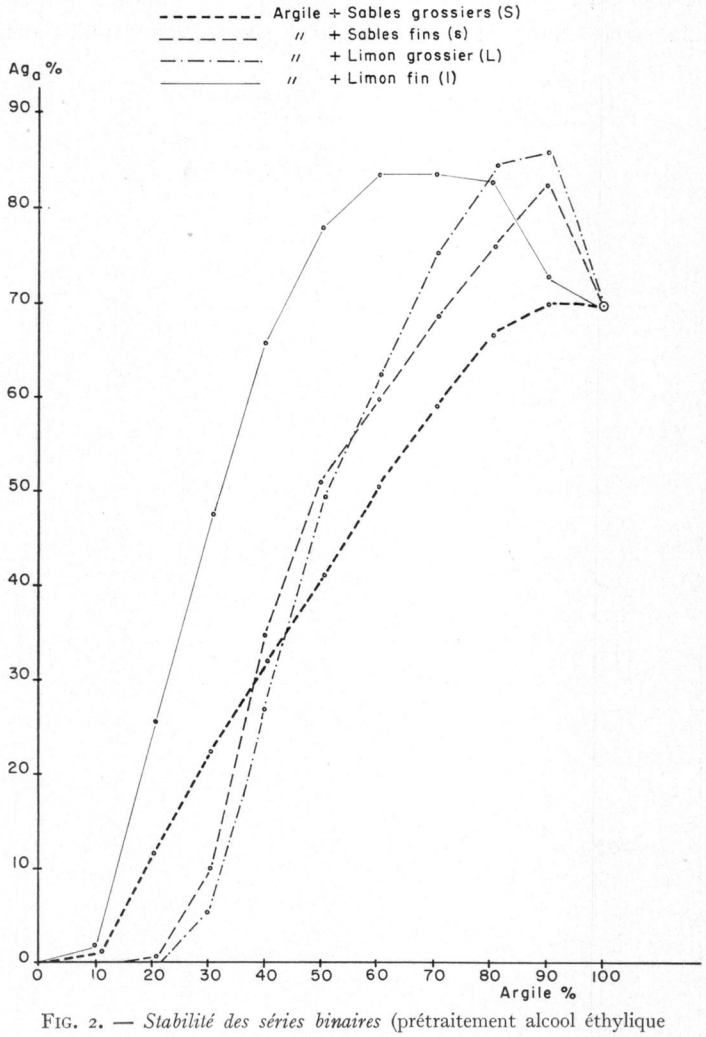


FIG. 2. — *Stabilité des séries binaires* (prétraitement alcool éthylique

TABLEAU 3

Séries	Teneurs en argile pour lesquelles la stabilité apparaît après prétraitements :		
	Air	Alcool	Dioxane
al	30	> 10	< 10
aL.....	> 30	> 20	20
as	> 30	> 20	> 20
aS	> 10	10	10

Pour les teneurs en argile inférieures à 40 p. 100 l'action « protectrice » des prétraitements est très marquée dans la série *al* et pratiquement nulle dans la série *a*S;

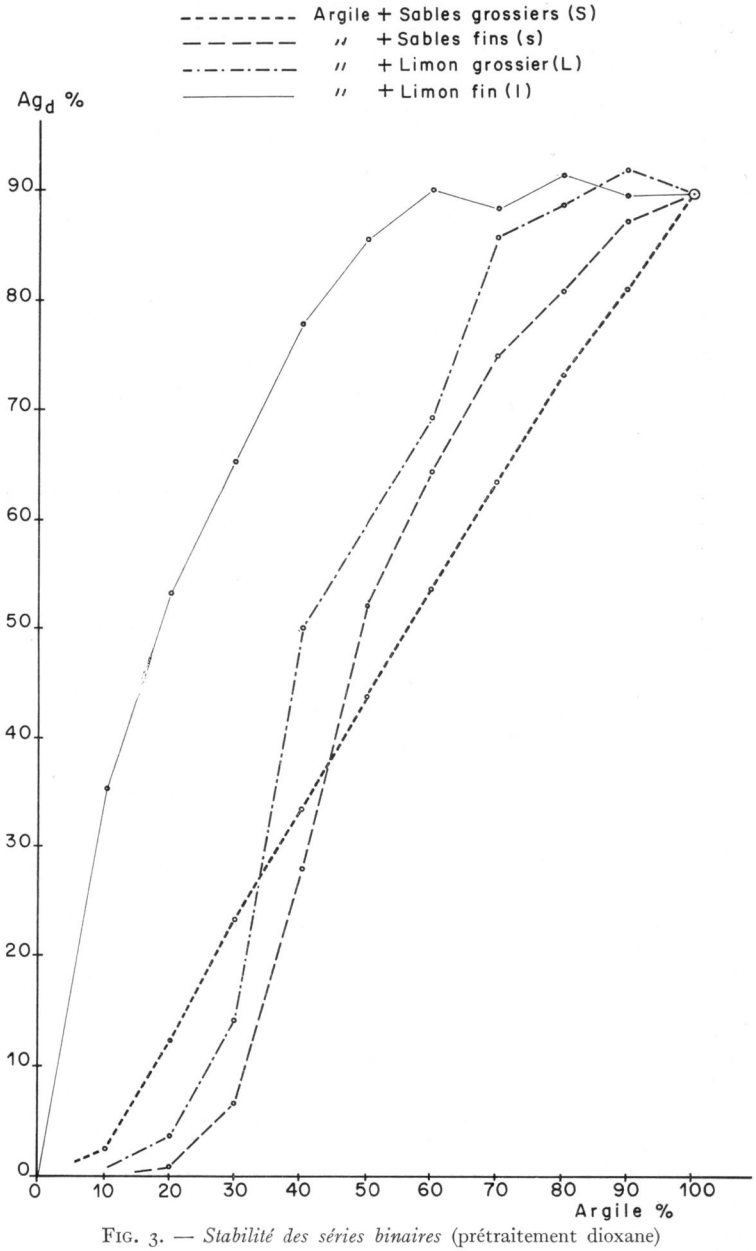


FIG. 3. — *Stabilité des séries binaires* (prétraitement dioxane)

les séries *a*L et *as* ayant à nouveau à cet égard un comportement semblable et intermédiaire entre les deux précédents.

Le tableau 3 dans lequel nous avons fait figurer pour les quatre séries le taux

d'argile minimum à partir duquel la stabilité aux différents traitements commence à se manifester, précise ces différences.

Dans la gamme des fortes teneurs en argile, l'action protectrice se manifeste en augmentant les coordonnées du maximum de stabilité (valeur de ce maximum et teneur en argile pour laquelle il est obtenu) à tel point qu'après prétraitement au dioxane la baisse de stabilité notée après action directe de l'eau disparaît dans tous les cas.

Enfin, on peut constater que pour une stabilité à l'eau (Ag_e p. 100) donnée l'action protectrice des prétraitements est très variable d'une série à l'autre. Ce fait est particulièrement remarquable au moment où apparaissent les premiers taux significatifs d'agrégats stables sans prétraitement dans chaque série (tabl. 4).

TABLEAU 4

Action comparée des prétraitements aux faibles stabilités

	al	*a*L	*as*	*a*S	
Ag_e (%)	4	7	3	1	17
Ag_a (%)	50	34	11	3	19
Ag_d (%).....	67	53	11	3	19

Tout en nous réservant de revenir sur ce point au cours de la discussion, nous pouvons déjà noter que les résultats obtenus, dans les séries *as* et *a*S principalement, paraissent ne pas être conformes à ce que l'on sait de l'action des prétraitements qui correspond mieux au comportement des séries *a*L et *al*.

Cette distinction doit toutefois être nuancée : l'observation directe et les comptages de particules effectuées sur les différentes séries d' « agrégats stables » récoltés montrent en effet que la quantité d'agrégats stables et leur taille moyenne peuvent varier de façon indépendante. Même si cette constatation n'est pas aisément interprétable, elle met en lumière le caractère complexe de la signification d'un taux d'agrégats stables. Celui-ci reflète en effet simultanément la plus ou moins grande résistance, selon leur cohésion propre, des divers types d'assemblages qui constituent le matériau étudié et aussi la position par rapport à 200 μ, limite conventionnelle de tamisage, de la taille des agglomérats résultant de la dégradation au cours des tests. Aussi avons-nous été conduits à apprécier par une méthode plus directe la cohésion des particules soumises aux tests.

B. — *Résultats des tests de cohésion*

On sait que c'est la valeur de la cohésion des agglomérats à l'état humide C*h* qui intervient dans le schéma proposé par S. HÉNIN. C'est donc cette caractéristique que nous devons apprécier. Sa signification a été précisée par G. MONNIER (1965), et J. CONCARET (1967) a proposé pour l'apprécier un test applicable à des agglomérats naturels d'une taille voisine de 1 à 2 mm.

Ceux-ci, préalablement dégazés sous vide puis humectés par capillarité à partir d'une plaque de porcelaine de porosité très fine, sont comprimés entre le plateau d'une

balance à lecture directe et une butée mobile. Le « seuil de rupture » de l'agrégat, par lequel nous avons conventionnellement caractérisé la cohésion à l'état humide, correspond à l'indication fournie par l'échelle mobile de la balance au moment où l'effort continu appliqué par l'intermédiaire de la butée provoque le premier écrasement : celui-ci est perceptible par un arrêt momentané ou un léger retour en arrière de l'échelle de lecture.

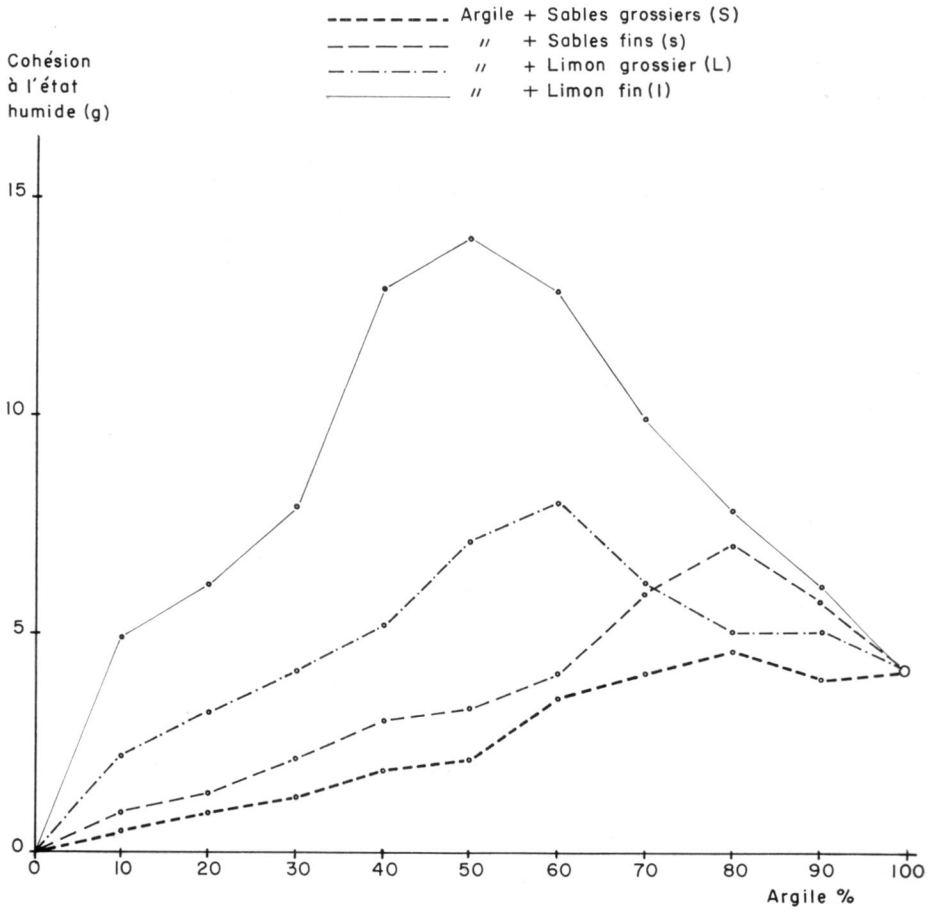


FIG. 4. — *Cohésion de terre humide des séries binaires*

Une quarantaine d'agglomérats de chaque échantillon ont été soumis à ce test dont les résultats (valeur moyenne) sont rassemblés sur la figure 4.

On constate que, dans leurs grandes lignes, les variations de cohésion correspondent à celles de la stabilité structurale. Toutefois, si l'on compare plus en détail ces deux séries de résultats, un certain nombre de différences peuvent être relevées :

— le maximum de cohésion est atteint pour des teneurs en argile inférieures (d'environ 10 p. 100) à celles correspondant au maximum de stabilité ; d'autre part, la baisse de cohésion qui intervient alors est plus marquée que la diminution notée pour la stabilité;

— le comportement particulier de la série *a*S plus stable que les autres jusqu'à 40 p. 100 d'argile, moins stable au-delà, disparaît : la courbe de cohésion correspondante reste constamment au-dessous de celle des autres séries.

INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS ET DISCUSSION

Il nous reste maintenant à rechercher une interprétation susceptible de rendre compte de l'ensemble de ces résultats dont certains, rappelons-le, apparaissent comme assez surprenants.

Pour cela, nous examinerons concurremment les résultats des tests de stabilité et de cohésion dans deux gammes distinctes de teneur en argile.

A. — *Échantillons contenant moins de 40 p. 100 d'argile*

Une teneur en argile de 40 p. 100 peut être considérée comme critique. En effet :

— les premiers agrégats stables apparaissent toujours pour des teneurs inférieures à 40 p. 100 et le franchissement de ce taux entraîne dans toutes les séries un accroissement très marqué de stabilité ;

— dans tous les cas, l'action protectrice des prétraitements est plus importante, entre 0 et 40 p. 100 d'argile, que ce qu'elle sera pour des matériaux plus argileux ;

— jusqu'à 40 p. 100 d'argile, la série *a*S manifeste une stabilité vis-à-vis de l'action directe de l'eau plus grande que les autres séries.

Il apparaît qu'une explication du comportement des matériaux étudiés devra donc, pour être retenue, donner une valeur priviligiée à une telle teneur en argile.

Si l'on recense toutes les variables qui, dans les conditions où nous avons opéré, peuvent intervenir dans les variations de cohésion de terre humide et donc de stabilité structurale, on relève :

1. la teneur en ciment argileux ;
2. la taille des particules limoneuses ou sableuses qui lui sont associées ;
3. la disposition relative des uns et des autres.

La stabilité en l'absence de ciment argileux étant toujours nulle, les variables 2 et 3 doivent intervenir indirectement dans la stabilité en modifiant l'action de l'argile. On peut supposer que ces interventions s'exercent en particulier par l'intermédiaire des vides que les particules laissent entre elles suivant leur arrangement. La répartition de la phase ciment entre les grains du squelette pourrait alors résumer et traduire l'action des différentes variables et leur influence globale sur la stabilité des assemblages ainsi définis.

Étude de l'arrangement des particules limoneuses et sableuses.

L'étude des dispositions relatives de particules sphériques de même diamètre montre que six cas sont possibles qui conduisent à des valeurs différentes de la porosité interstitielle.

Nous retiendrons seulement les deux types extrêmes d'assemblage conduisant aux porosités maxima et minima :

— l'arrangement dit cubique qui a pour conséquence une porosité de 47,64 p. 100 ;

— l'arrangement dit rhombique qui ménage une porosité minima de 25,95 p. 100.

En tenant compte de la densité réelle des fractions limoneuses et sableuses (voisine de 2,66 dans tous les cas) et de la densité apparente à l'état sec de l'argile utilisée qui est de 1,80 dans les conditions de fabrication que nous avons retenues, on peut calculer les pourcentages pondéraux d'argile nécessaire pour remplir les vides dans ces deux cas extrêmes, soit 38,10 p. 100 dans l'arrangement le plus lâche et 19,10 p. 100 dans l'arrangement rhombique le plus serré possible.

L'exploitation de ces données théoriques faite en supposant que l'argile est répartie d'une façon idéalement homogène entre les particules du squelette conduirait aux conclusions suivantes :

— pour des teneurs inférieures à 19,1 p. 100, l'argile n'est pas présente en quantité suffisante pour assurer une cimentation continue, et cela quel que soit le type d'arrangement des grains du squelette ;

— pour les taux supérieurs à 38,10 p. 100, la phase argileuse est continue quel que soit le type d'arrangement ;

— pour les taux d'argile compris entre ces deux valeurs, la continuité de la phase argileuse dépend des proportions entre les différents types d'arrangement.

La transposition de ces conclusions au comportement des mélanges à deux fractions étudiées ne peut être faite sans tenir compte du fait que le diamètre des particules associées à l'argile y varie à l'intérieur même d'une classe granulométrique, pouvant ainsi modifier les possibilités d'arrangements définis pour des ensembles de particules sphériques de même diamètre.

En particulier, dans un empilement de particules de limon fin, il est théoriquement possible — le rapport des diamètres extrêmes définissant la classe étant supérieur à 6,52 — d'obtenir des arrangements très serrés ménageant des porosités nettement inférieures à 26 p. 100, alors que cela n'est pas possible dans les classes de limon grossier ou de sables fins et grossiers pour lesquelles ces rapports sont respectivement, dans le cas des matériaux que nous avons utilisés, de 2,50, 2,63, et 3,57.

En prenant en considération ces données complémentaires il est possible d'examiner les variations de comportement des différentes séries par rapport aux seuils théoriques correspondant sensiblement à des teneurs en argile de 20 et 40 p. 100.

a) *Lorsque la teneur en argile est inférieure à 20 p. 100.*

Nous n'obtenons pas d'agrégats stables dans les séries *a*L et *as* même avec le prétraitement le plus protecteur (dioxane). Par contre, les mélanges *al* peuvent à partir de 10 p. 100 d'argile manifester une certaine stabilité perceptible, au fur et à mesure que la teneur en argile augmente, à des traitements de plus en plus agressifs.

b) *Entre 20 p. 100 et 40 p. 100 d'argile.*

Dans les séries *a*L et *as*, il n'y a que très peu d'agrégats stables à l'eau jusqu'à ce que la teneur en argile atteigne 40 p. 100. Dans le cadre de l'hypothèse choisie cela signifie que les arrangements de type rhombique doivent être assez rares et dispersés pour que la phase continue d'argile n'affecte que très rarement des volumes suffisamment importants ($d > 200\ \mu$) pour être recueillis lors du tamisage.

Cette hétérogénéité doit se traduire, toujours dans cette hypothèse, par la présence de volumes au sein desquels la porosité ménagée par l'arrangement des particules limoneuses ou sableuses est plus faible. Ceci aboutit à une meilleure cimentation par l'argile, et explique également la faible efficacité protectrice des prétraitements sur des assemblages relativement résistants.

Par contre, dans le cas du limon fin, la distribution dimensionnelle plus étalée de ses constituants assure un type d'arrangement serré plus homogène. La stabilité croît assez sensiblement dans cette gamme de teneurs en argile. Toutefois, si les ensembles de particules peuvent être cimentés, ils sont relativement fragiles, en raison de la faible épaisseur de la phase argileuse. Les prétraitements en atténuant le phénomène d'éclatement est en mesure d'assurer une action protectrice sensible. Les résultats du prétraitement au dioxane ($Ag_a \neq 80$ p. 100) confirment la présence d'une phase continue d'argile dans l'ensemble du matériau pour des teneurs inférieures à 40 p. 100. Examinés comparativement, les taux Ag_a et Ag_e soulignent la fragilité des éléments structuraux obtenus dans cette gamme de texture.

Ainsi le comportement des trois séries *al*, *a*L, *as* est parfaitement compatible avec l'hypothèse retenue, — et confirme l'importance majeure de l'apparition d'une phase continue d'argile, condition nécessaire à la constitution d'agglomérats résistants d'une taille supérieure à 200 μ ; il fournit de plus une indication, vérifiable d'ailleurs par des mesures directes de porosité, sur la faible importance des arrangements de type rhombique (porosité 25,95 p. 100) qui ne sont responsables que d'au plus 3 à 10 p. 100 d'agrégats stables — lorsque le taux d'argile passe de 20 à 40 p. 100 dans les séries *a*L et *as*. Enfin, le comportement remarquable de la série *al* souligne l'importance considérable de l'étalement de la distribution dimensionnelle des éléments du squelette. Ce dernier point prendra évidemment une grande signification lorsque sera abordée l'étude du comportement de textures plus complexes.

c) *Étude particulière de la série aS.*

L'interprétation générale précédente ne s'applique pas de toute évidence aux matériaux *a*S dont la stabilité croît linéairement avec la teneur en argile, et cela dès les plus petites teneurs en cette dernière.

Précisons tout d'abord que, dans le cas de la série *a*S, le taux d' « agrégats stables » comptabilisé est égal au taux de matériau resté sur le tamis diminué du taux de sables grossiers de l'échantillon. Il s'agit donc d'agrégats dits « vrais ». L'observation directe de ce qui reste sur la toile à l'issue du tamisage montre qu'il s'y trouve d'une part, des sables grossiers nus et complètement séparés de l'argile et d'autre part, des agglomérats de ciment argileux à l'état pur. Nous appellerons cette séparation « différenciation des phases ».

Ce qui distingue les matériaux *a*S à moins de 40 p. 100 d'argile de leurs homologues des séries *a*L et *as* c'est d'abord que les vides laissés par l'assemblage des sables grossiers ont des dimensions d'un ordre de grandeur supérieur à 200 μ ; ensuite que la surface de contact entre l'argile et les éléments sableux est respectivement 30 et 6 fois plus faible. Ces deux raisons font que la différenciation des phases est apparente et efficace dans le cas des sables grossiers. Les éléments de la phase discontinue d'argile sont susceptibles d'avoir individuellement une taille suffisante pour s'assurer lors du tamisage le comportement d' « agrégats stables ».

Dans cette hypothèse, on peut penser que la phase argileuse de la série *a*S se comporte vis-à-vis du test de stabilité comme si les sables grossiers n'intervenaient pas. Pour le vérifier nous avons comparé dans le tableau 5 les taux d'agrégats vrais mesurés et le taux d'agrégats stables calculés, c'est-à-dire le taux qu'on obtiendrait si l'argile contenue dans le mélange était testée seule (1).

TABLEAU 5

Comparaison des taux d'agrégats stables mesurés et calculés pour la série a*S*

	Ag_e (%)		Ag_a (%)		Ag_d (%)	
	mesuré	calculé	mesuré	calculé	mesuré	calculé
$a_{20}S_{80}$	9	11	11	15	12	18
$a_{30}S_{70}$	17	17	23	22	23	27
$a_{40}S_{60}$	26	22	33	30	33	36

L'accord se montre suffisamment satisfaisant pour que l'explication avancée soit retenue. Nous verrons par ailleurs que la différenciation de la phase la plus grossière se manifeste également dans les mélanges les plus complexes et permet là aussi d'expliquer leur comportement vis-à-vis du test de stabilité.

B. — *Échantillons contenant plus de 40 p. 100 d'argile*

A partir de ce taux critique, nous avons vu que quel que soit l'arrangement des constituants du squelette il existait nécessairement une phase continue d'argile. La conséquence en est, comme on pouvait le prévoir, un accroissement brutal de stabilité

TABLEAU 6

Diminution des rapports Aga/Age et Agd/Age lorsqu'on passe de 40 à 50 p. 100 d'argile

	Texture	*a* p. 100			
		30	40	50	60
$\frac{Ag_a}{Ag_e}$	*al*	24	3	1,1	1,1
	aL	12	9	3,5	1,7
	as	5	4,5	2,0	1,4
$\frac{Ag_d}{Ag_e}$	*al*	32	3,4	1,15	1,15
	aL	26	13	4	1,50
	as	12	5,7	2,0	1,50

(1) Par exemple pour le mélange $a_{30}S_{70}$ le taux Ag_e p. 100 est égal à 55 p. 100 (taux d'Ag_e de l'argile pure) × 0,30 = 17 p. 100.

dans toutes les séries (*a*S exceptée) lorsqu'on passe de 40 à 50 p. 100 d'argile. Le taux d'Ag_e triple ou quadruple. Parallèlement on note à 50 p. 100 d'argile pour ces trois séries une diminution générale de l'efficacité des prétraitements, ce qui correspond à l'apparition d'une majorité d'agglomérats suffisamment solides pour résister à l'action directe de l'eau (tabl. 6).

En ce qui concerne la série *a*S, son comportement continue d'être très distinct de celui des autres séries, mais les causes auxquelles on peut alors penser sont fort différentes. Dès lors qu'on se trouve en présence d'une phase continue d'argile, dans cette série comme dans les autres, le phénomène de différenciation des phases ne se manifeste plus. Dans ces conditions, le taux d'agrégats dits « vrais » par lequel est caractérisée la stabilité de cette série ne correspond plus à une réalité physique. La soustraction des sables grossiers revient purement et simplement à sous-estimer la stabilité puisqu'ils participent au même titre désormais que des sables fins et limons à la constitution des particules complexes stables qui restent sur le tamis.

Si l'on corrige cette erreur systématique, la série *a*S marque elle aussi un accroissement considérable de stabilité dès que la teneur en argile dépasse 40 p. 100.

Il nous faut maintenant rechercher les causes de la diminution de stabilité enregistrée pour toutes les séries traitées directement par l'eau lorsque la teneur en argile dépasse un certain seuil.

TABLEAU 7

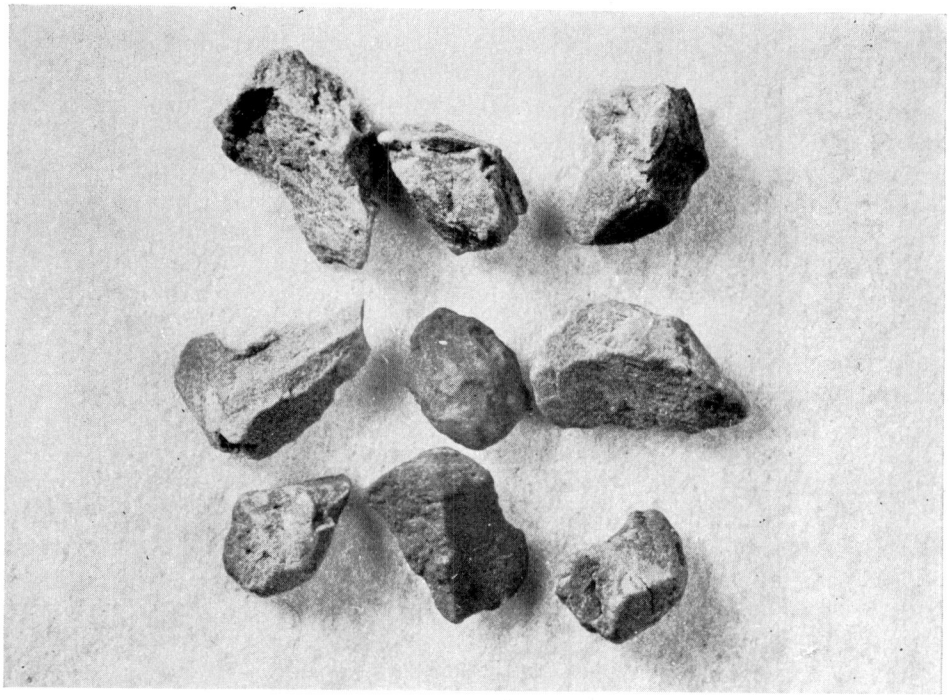
Taux d'agrégats fissurés

Texture	*a* p. 100									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
al	0	0	0	4	15	40	100	100	100	100
*a*L	0	0	0	0	5	25	80	100	100	100
as	0	0	0	0	1	3	15	70	100	100
*a*S	0	0	0	10	40	60	80	100	100	100

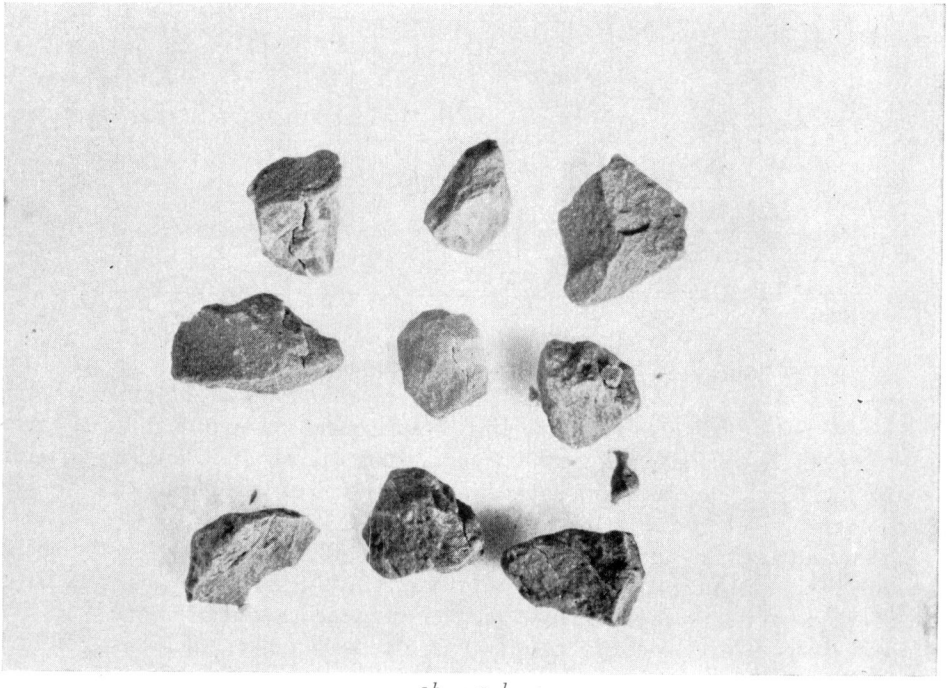
L'observation à l'œil nu puis à la loupe binoculaire des agrégats très argileux montre que lorsqu'on les humecte ils sont le siège d'une fissuration plus ou moins intense. Le fait que ces fissures se manifestent également lorsqu'on imbibe les agglomérats intéressés sous vide à partir d'une plaque poreuse ou par de l'alcool éthylique, montre que le phénomène est indépendant de l'éclatement par lequel se désagrègent les agglomérats peu stables.

D'autre part, une observation systématique de tous les échantillons humectés par de l'alcool éthylique a permis de faire les constatations suivantes (photos 1*a* à 1*g* :)

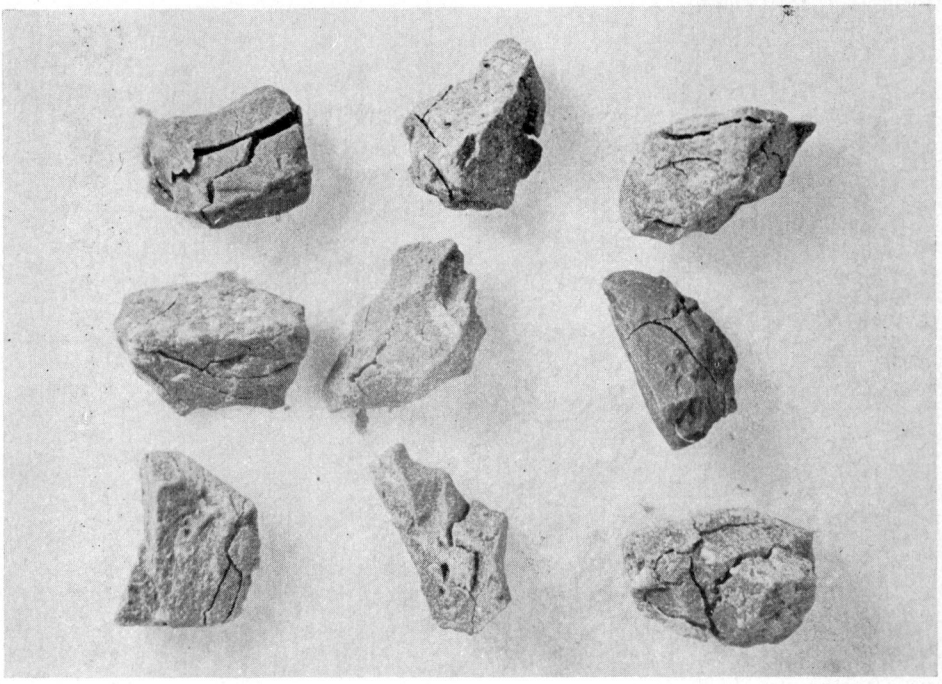
— la fissuration ne se manifeste que pour des teneurs en argiles égales ou supérieures à 40 p. 100, c'est-à-dire lorsqu'il existe nécessairement une phase continue d'argile ;



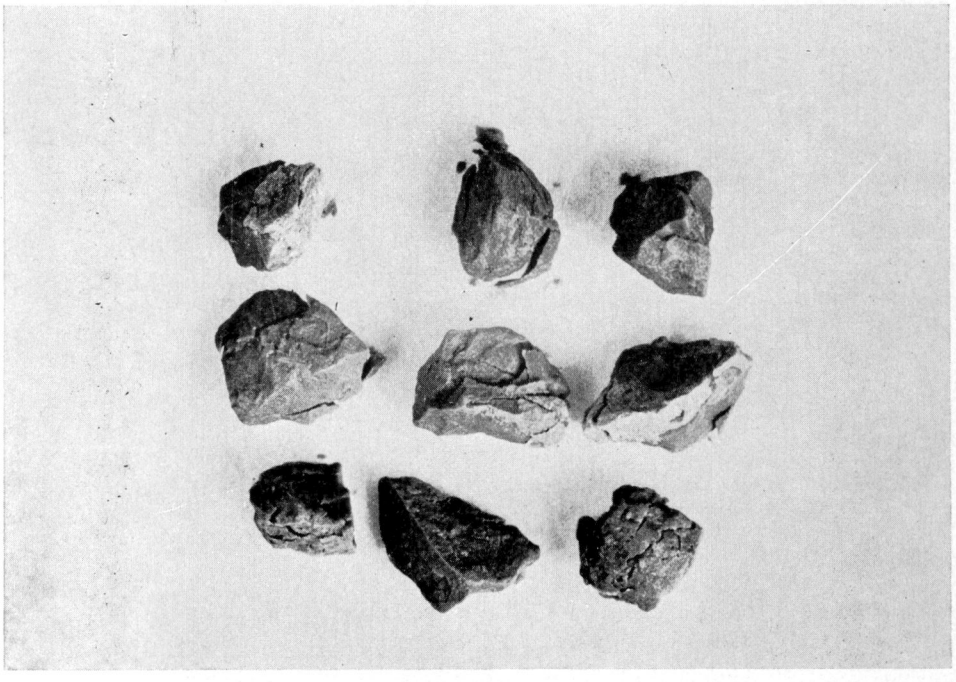
1*a*. — $a_{50}l_{50}$



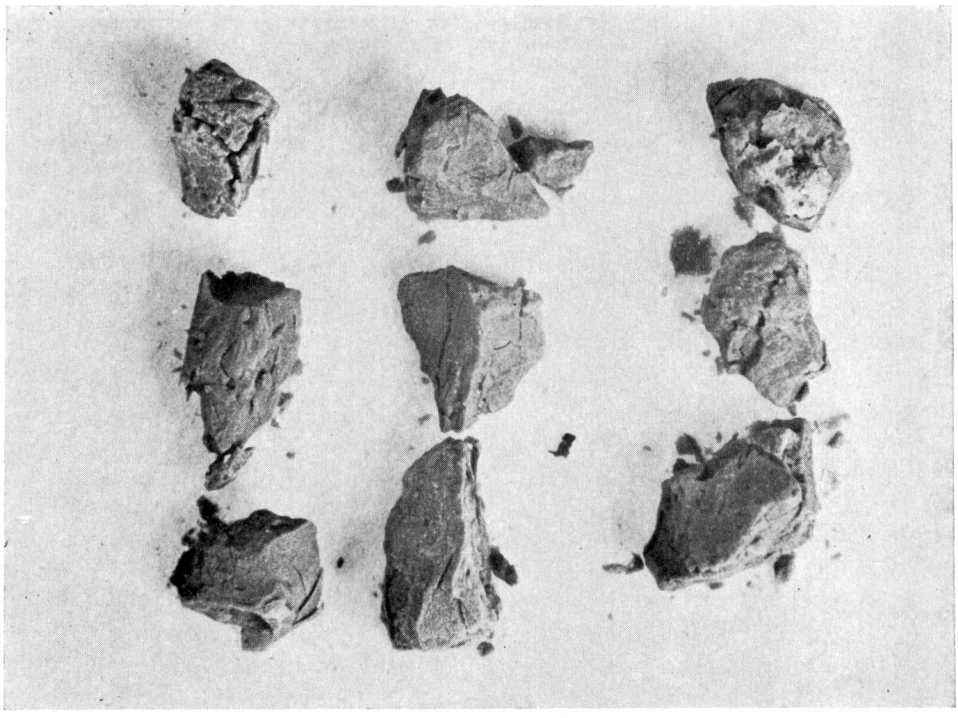
1*b*. — $a_{60}l_{40}$



1*c*. — $a_{70}l_{30}$



1*d*. — $a_{80}l_{20}$



1*e*. — $a_{90}l_{10}$

1*f*. — ${}_{90}a\ l_3(\mathrm{L}+s)_2\mathrm{S}_5$, sol argileux naturel

Photos 1. — *a*, *b*, *c*, *d*, *e*, *f* —

Apparition et intensité de la fissuration telle qu'elle se manifeste lors de l'humectation ménagée d'agglomérats de 1 à 2 mm. Influence de la texture des mélanges binaires

— le taux d'agrégats affectés par la fissuration dans chaque série croît à mesure que la teneur en argile augmente ;

— l'intensité de la fissuration (inverse de la distance entre les fissures) est d'autant plus forte que le taux d'argile est plus élevé ; il y a une relation entre l'intensité de fissuration et le nombre d'agrégats affectés.

Le tableau 7 illustre les différents points que nous venons de mentionner.

On constate que la fissuration se manifeste à partir de taux d'argile qui sont différents d'une série à l'autre et dont le classement rappelle celui des teneurs en argile correspondant aux maxima de cohésion et de stabilité.

On peut suggérer que l'effet premier de la fissuration consiste à réduire la taille des particules qui sont effectivement soumises au test, et cela d'autant plus que la fissuration est plus intense. La conséquence directe en est que le taux d'agrégats stables doit diminuer. En effet, si l'on admet à la limite une intensité de fissuration telle qu'avant tout éclatement, l'agglomérat se divise en particules d'une taille inférieure à 200 μ, il devient évident que le taux mesuré d'agrégats stables sera nécessairement nul quelle que soit la résistance au processus de dégradation des particules résultant de la fissuration.

TABLEAU 8

Mise en évidence du rôle de la fissuration dans la baisse apparente de stabilité aux fortes teneurs en argile

(série *al*)

a p. 100	30	40	50	60	70	80	90	100
Ag_e % Ag initiaux 1 à 2 mm	2	23	75	**78**	73	67	57	53
Ag_e % Ag initiaux 0,28-1 mm	—	—	29	41	49	**57**	42	41
Nombre d'Ag_e dans 100 mg	—	—	500	**321**	865	1 375	1 740	1 780
P. 100 particules 20-200 μ	70	56	18	**17**	21	27	34	36

Un certain nombre d'éléments rassemblés dans le tableau 8 et qui concernent la série *al* confirment d'ailleurs le bien fondé de cette explication.

On constate tout d'abord que la taille moyenne des agrégats stables — dont une idée est fournie par le nombre de particules restées sur le tamis présentes dans 100 mg — diminue sensiblement au fur et à mesure que la teneur en argile augmente au delà du seuil de fissuration.

D'autre part, le taux des particules comprises entre 20 et 200 μ — nécessairement des agglomérats dans cette série (1) — qui s'accroît dans les mêmes conditions,

(1) Où n'existent que des particules élémentaires < 20 μ

montre que la diminution du taux d'agrégats > 200 μ est compensée par l'apparition aux fortes teneurs en argile d'une quantité supplémentaire de « sous-agrégats » (20-200 μ).

Enfin, si l'on remplace tout au long d'une série les agrégats initiaux de 1 à 2mm normalement soumis aux tests par des agrégats plus petits (0,28 à 1 mm) et donc moins susceptibles d'être fragmentés pour une intensité de fissuration donnée, on constate qu'effectivement le maximum apparent de stabilité est atteint pour une teneur en argile de 20 p. 100 supérieure.

Le fait que les courbes de cohésion reflètent également ce phénomène — dont les conséquences sur le comportement au tamisage semble, nous venons de le voir, lié au choix, nécessairement arbitraire, de 200 μ comme limite inférieure de taille des agrégats stables — s'explique lui aussi aisément. Les valeurs qui ont permis de tracer les courbes sont, rappelons-le, des valeurs moyennes. En fait, dès qu'une partie au moins des agrégats soumis au test de cohésion sont fissurés, ce dernier met en évidence deux types différents de résistance à la rupture :

— pour les agrégats intacts, il s'agit toujours de la cohésion à l'état humide telle que nous l'avons définie ;

— pour les agrégats fissurés, on apprécie plutôt une résistance à la fragmentation suivant les surfaces des fissures.

L'étude fréquentielle des valeurs de « cohésion » obtenues échantillon par échantillon tout au long d'une série, permet de préciser l'incidence de cette perturbation des mesures.

Jusqu'à une teneur en argile variable d'une série à l'autre (30 p. 100 dans la série *al*, 50 à 60 p. 100 dans la série *a*L) la distribution des « cohésions » mesurées des 30 à 40 agrégats représentatifs de chaque texture est normale ; son écart-type est faible : la moyenne des mesures est une représentation convenable de la cohésion intrinsèque du matériau testé. Au-delà on constate d'abord un accroissement brutal de l'écart-type qui triple dans la série *al* par exemple lorsque le taux d'argile passe de 30 à 40 p. 100 ; puis la distribution s'altère profondément : sa courbe représentative tend à devenir bimodale. La première population, dont l'importance relative croît au fur et à mesure que le taux d'argile s'élève, représente les agrégats fissurés : la moyenne des « cohésions » correspondantes ne représente plus que la résistance à la fragmentation. La deuxième population, formée des résultats obtenus sur les agrégats intacts, a une moyenne plus élevée et correspond encore à la cohésion intrinsèque du matériau : elle a tendance à croître avec la teneur en argile. Il n'a toutefois pas été possible de la calculer, la sous-population devenant très vite trop peu importante. Enfin, à partir de 70 p. 100 d'argile dans la série *al*, 100 p. 100 des agglomérats étant fissurés, la distribution redevient normale et son écart-type réduit, mais la moyenne des mesures ne traduit plus que l'intensité de la fissuration.

Cette rapide analyse permet de comprendre l'allure des variations d'une moyenne générale de « cohésion » qui pouvait paraître paradoxale dans la mesure où elle semblait inférer que la cohésion d'un matériau diminue lorsque sa richesse en ciment argileux augmente.

L'ensemble des résultats de stabilité et de cohésion directement appréciées peut donc être considéré comme cohérent : le décalage entre les deux séries de mesure provient essentiellement d'une incidence différente de la fissuration sur les deux types de tests.

D'autre part, le *caractère apparent* de la baisse de stabilité des matériaux argileux est confirmé.

Enfin, un comportement physique des terres est mis en évidence par une étude qui *a priori* ne le concernait pas : l'aptitude à la fissuration apparaît étroitement liée à la texture des terres. Ceci confirme les conclusions auxquelles étaient parvenus S. HÉNIN et J. BOSQUET (1964).

CONCLUSIONS

Nous rappellerons, en les limitant à l'essentiel, les principaux résultats obtenus au cours de ce premier travail limité à l'étude des mélanges dits « binaires ». Ceux-ci peuvent être considérés comme des modèles représentant de façon très simplifiée les principaux caractères de constitutions granulométriques plus complexes.

— En l'absence de matière organique, la présence d'un ciment argileux floculé de façon stable est une condition indispensable à la stabilité d'un matériau terreux. D'une façon générale, cette stabilité croît avec la teneur en argile, quelle que soit la granulométrie des particules qui sont associées au ciment : un accroissement de la cohésion à l'état humide est responsable de cette évolution.

— Toutefois, si les grandes lignes de la stabilisation par l'argile sont communes aux quatre combinaisons étudiées, elles mettent de plus en évidence l'influence notable de la dimension des particules complémentaires sur les modalités de cette action.

— Cette influence se manifeste différemment suivant les grands types de texture auxquels on a affaire. Pour les matériaux relativement peu argileux, l'élément déterminant paraît être *l'apparition d'une phase continue d'argile*. Cette condition est évidemment sous la double dépendance de la porosité ménagée par la disposition des particules limoneuses ou sableuses et de la densité apparente de la phase argileuse elle-même. Seul le premier point a été examiné ici. Il ressort clairement que la distribution granulométrique à l'intérieur de la fraction associée à l'argile est déterminante à cet égard. Nous montrerons ultérieurement que cette conclusion prend une importance encore accrue dans le cas d'échantillons dont la granulométrie est plus complexe et donc dans les matériaux naturels. Le fait que les variations de stabilité qui ne seraient explicables que par le jeu de la proportion relative des arrangements de type cubique (lâche) ou rhombique (serré) soient insignifiantes, conduit à penser que, malgré son importance théorique, ce caractère structural du squelette ne présente, au moins dans les conditions où nous avons opéré, qu'une importance relativement faible.

— Dans la même gamme de richesse en argile, mais en présence d'éléments grossiers (série *a*S), *la différenciation des phases* conduit à la séparation d'amas localisés d'argile pure d'une taille suffisante pour être classés par le test utilisé comme des agrégats stables. Ainsi se manifeste le caractère textural plus argileux lié à la présence de sables grossiers dans un matériau.

Cet aspect du comportement de la série *a*S ajouté au comportement comparé des séries *a*L, *as*, *a*S suggère que la surface de contact entre le ciment argileux et les particules qu'il associe intervient de façon importante lorsque les conditions

d'arrangement (porosité du squelette) sont égales par ailleurs. Cette caractéristique texturale, dont l'intérêt a été montré par ailleurs (G. MONNIER 1966), devra certainement être prise en considération dans les développements ultérieurs de ce travail.

— Lorsqu'il existe une phase continue d'argile, l'interprétation du taux d'agrégats stables recueillis à l'issue des opérations de tamisage, aussi bien que celle des valeurs de la cohésion de terre humide telle que nous l'avons mesurée est compliquée par l'apparition d'une *fissuration* plus ou moins intense. Si l'affinement des éléments structuraux qui en résulte peut être considéré, toutes choses étant égales par ailleurs, comme une prédisposition à la dégradation, cette conséquence éventuelle est considérablement surestimée dans le résultat des deux séries de tests.

Nous avons vu que cela met en cause la limitation à 200 μ de la taille des agrégats stables. Le comportement des terres argileuses, qui par suite de leur fissuration plus intense, fournissent des agrégats stables de dimension moyenne plus faible, souligne évidemment le caractère conventionnel de cette limite et, corollairement, celui de l'indice de stabilité I_s. Toutefois, l'accord entre cet indice et le comportement apprécié directement au champ suffit à valider cette convention dans la majorité des cas ; d'autant que la prise en considération dans l'indice global de la quantité d'éléments $< 20\ \mu$ dispersés permet de tenir compte indirectement des particules stables d'une taille inférieure à 200 μ.

La dernière conclusion que l'on peut dès maintenant tirer de cette première étape du travail a trait à la notion de texture dont le contenu a, semble-t-il, été précisé.

L'interprétation que nous avons présentée des relations existant entre la composition granulométrique d'un matériau, sa stabilité structurale et aussi, plus accessoirement, son aptitude à la fissuration s'est appuyée sur le pouvoir ciment de l'argile, le mode d'arrangement des particules limoneuses ou sableuses et la surface spécifique de ces dernières. Ceci conduit à penser qu'outre les données proprement granulométriques, la nature minéralogique de l'argile et sa garniture ionique, la forme et l'état de la surface des particules du squelette sont des éléments complémentaires de caractérisation de la texture qu'il conviendrait de prendre en considération pour préciser et parfois même pour comprendre le comportement de certains sols.

Il reste que l'on peut affirmer que la distribution granulométrique est un élément essentiel qui doit permettre, lorsque les autres facteurs en cause sont analogues, de prévoir dans une large mesure le comportement physique général d'une terre.

Reçu pour publication en février 1968.

SUMMARY

EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON THE PART PLAYED BY THE GRANULOMETRIC COMPOSITION OF SOILS IN THEIR STRUCTURAL STABILITY

The study of binary mixtures (clay + silty or sandy fractions), taken as patterns of earthy material with a more complex granulometry, allowed to put into evidence the conditions under which water stable aggregates are formed in the absence of organic matter.

1) The formation of a continuous phase or argillaceous cement which deperds (both) on the clay-content and the porosity created by the disposition of the silty and sandy particles.

2) The demixion of the coarse particles from the clay, called « phase differentiation » accounts for the special behaviour of the clay-sandy samples.

3) The more or less numerous cracks which appear in highly argillaceous samples show the complex nature of the notion of « stable aggregate » and provides an interpretation for a physical behaviour of definite agronomical importance.

ZUSAMMENFASSUNG

EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG ÜBER DEN EINFLUSS DER KORNZUSAMMENSETZUNG DER BÖDEN AUF DEREN STRUKTURFESTIGKEIT

Die Untersuchung von binären Gemischen (Ton + lehmige oder sandige Fraktion), die als Modelle erdiger Materiale, deren Kornstruktur komplexer ist, betrachtet werden, erlaubt es, die Entstehungsbedingungen von wasserbeständigen Aggregaten in Abwesenheit organischer Substanzen zu verfolgen.

1) Die Entstehung einer kontinuierlichen Phase von tonigem Zement steht in doppelter Abhängigkeit vom Tongehalt und der Porosität, die durch die Anordnung der lehmigen und sandigen Teilchen geschaffen wird.

2) Die Trennung aus dem Ton der vorher gemischten groben Teilchen, oder die Phasendifferenzierung », erklärt das charakteristische Verhalten der sandtonigen Proben.

3) Die mehr oder weniger ausgeprägte Bildung von Rissen in stark tonigen Proben weist den komplexen Charakter des Begriffs « beständiges Aggregat » auf, und liefert eine strukturelle Erklärung eines physischen Verhaltens, dessen agronomische Bedeutung unbestreitbar ist.

Экспериментальное изучение влияния гранулометрического состава почвогрунтов на устойчивость их структуры.

Д. ХЕЙРАБИ, Г. МОННЬЕ.

РЕЗЮМЕ

Изучение смесей вторичной эпохи (глина + илистая, или песочная фракция), рассматриваемых в качестве моделей почвенного материала с более сложной гранулометрией, позволило выявить условия появления агрегатов, прочных по отношению к действию воды в отсутствии органического вещества.

1. Образование постоянной фазы глинистого цемента находящегося в двойной зависимости от содержания глины и порозности, обусловленной расположением илистых и песочных частичек.

2. Демиксия грубых частичек от глины, или « дифференциация фаз » об'ясняющая особое поведение грубых глинисто-песочных образцов.

3. Более или менее интенсивное растрескивание сильно-глинистых образцов выявляет сложный характер понятия « прочный агрегат », и позволяет текстуральную интерпретацию физического поведения, агрономическое значение которого определенно.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

COMBEAU A., 1960. Quelques facteurs de la variation de l'indice d'instabilité structurale dans certains sols ferrallitiques. *C. R. Acad. Agric.* 27 janvier 1960.

CONCARET J., 1967. Étude des mécaniques de la destruction des agrégats de terre au contact de solutions aqueuses. *Ann. agron.*, **18**, 65-90.

FEODOROFF A., 1960. Évaluation de la stabilité structurale des sols (Indice S). Nouvelles normes d'emploi pour l'appareil à tamiser. *Ann. agron.*, **11**, 651-659.

GRAS R., 1957. In *Le profil cultural*, S. E. I. A, Paris, 1960.

GRATON L. C., FRASER H. J., 1935. Systematic packing of spheres with particular relations to porosity and permeability. *J. Geology*, **43**, 785-909.

HÉNIN S., 1938. *Étude physico-chimique de la stabilité structurale des terres*. Thèse, Paris.

HÉNIN S., BOSQUET J., 1964. Relation entre le comportement des sols (effritement, fissuration) et leur texture. *C. R. Acad. Agric.* **59**, 842-847.

HÉNIN S., MONNIER G., 1956. Évaluation de la stabilité structurale du sol. *C. R. 5e Congr. internation. Sci. Sol*, Paris, Vol. B, 49-52.

MARTIN G., 1958. Note sur quelques caractéristiques physiques de 3 profils de sol dans des états de dégradation de la structure différents. *Rapport ORSTOM-IEC* (décembre).

MARTIN G., 1961. Étude de quelques facteurs de la structure des sols de la vallée du Niari. *Rapport ORSTOM-IEC* (août).

MÉRIAUX S., 1958. Stabilité structurale et composition des sols. *C. R. Acad. Agric.* 19 novembre.

MONNIER G., 1965. Action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols. *Ann. agron.*, **16**, 327-400 et 471-534.

MONNIER G., KHEYRABI D., 1966. Influence de la texture des sols sur leur stabilité structurale. *C. R. Acad. Sci.*, **262**, 485-487.

MONNIER G., 1966. Sur la couleur des terres considérée comme une caractéristique texturale. *C. R. Acad. Sci.* **264**, 2188-2191.

Ann. agron., 1968, **19** (2), 153-174.

ÉVOLUTION DE L'AZOTE ET DU CARBONE ORGANIQUES DU SOL AU COURS D'UNE EXPÉRIENCE DE LONGUE DURÉE

R. MOREL
avec la collaboration technique de G. PASQUALINI et Thérèse PHILIPPE

Laboratoire de la Chaire de Physico-Chimie et Science du Sol,
Ecole nationale supérieure agronomique, 78 - Grignon
Institut national de la Recherche agronomique

SOMMAIRE

Ce travail concerne l'évolution dans le temps de l'azote et du carbone organiques du sol, étudiée sur des parcelles cultivées, fertilisées très diversement depuis de nombreuses années. Il donne des résultats et interprétations relatifs à la formation et à la minéralisation de la matière organique du sol sous le climat de l'Ile-de-France.

INTRODUCTION

La matière organique du sol est l'objet d'un nombre considérable de travaux qui en abordent l'étude sous de multiples aspects ; sa formation, sa composition, son évolution posent au chercheur de très nombreuses questions dont peu, à l'heure actuelle, ont reçu une réponse définitive et satisfaisante.

L'origine initiale de ces difficultés tient pour une large part dans le fait que la matière organique du sol est étroitement associée à la vie dont elle provient et qu'elle entretient ; cette empreinte de la vie marque tout à la fois sa formation et son évolution.

L'évolution d'une substance organique initiale introduite dans le sol est un phénomène complexe : aux activités biochimiques conduisant à des simplifications moléculaires se superposent dans le même moment des actes chimiques ou biochimiques

se traduisant par la complication moléculaire observée dans le phénomène de l'humification. L'humus à son tour se dégrade, non sans qu'il se soit créé temporairement de solides liaisons avec la fraction minérale du sol.

Parallèlement à cette évolution, des transferts d'énergie d'une très grande importance surviennent à chaque étape du processus, transferts dont bénéficie notamment la masse des microorganismes du sol.

Deux sortes de difficultés se présentent dans l'étude de l'évolution de la matière organique. La première tient aux méthodes et aux techniques actuelles : celles-ci ne donnent pas la possibilité, dans un sol en place, d'atteindre la transformation chimique ou biochimique individuelle se rapportant à une substance déterminée. C'est pourquoi, à l'idée d'évolution de la matière organique, complexe et fort imprécise, il est plus aisé dans une première approche de substituer la notion d'évolution globale d'éléments essentiels entrant dans la composition des substances organiques du sol. L'azote et le carbone sont dans cette étude les éléments choisis, susceptibles de déterminations analytiques précises et reproductibles, permettant ainsi de discuter sur des données définies.

La seconde difficulté tient, sous notre climat, à la lenteur de l'évolution de certaines fractions de la matière organique dans les conditions naturelles. Ce fait engage à établir des essais de longue durée qui doivent se prolonger bien au-delà de la vie moyenne d'un chercheur. C'est pourquoi le champ d'expériences de Grignon, créé en 1875 par DEHÉRAIN est devenu, au fil des ans, un matériel de travail de grande valeur (DEHÉRAIN, 1876) ; c'est ce matériel qui est utilisé dans la présente étude.

INDICATIONS GÉNÉRALES SUR LE MILIEU ET LES CARACTÉRISTIQUES DE L'ESSAI

Le champ DEHÉRAIN (MOREL et *al.*, 1956) est implanté sur un sol brun colluvial faiblement lessivé ; le substratum calcaire se trouve à un mètre environ de la surface ; l'ensemble du profil est normalement drainé.

La couche arable présente les caractéristiques analytiques suivantes :

Argile	220 à 300 p. 1 000
Limon	210 à 260 p. 1 000
Sable fin	400 à 440 p. 1 000
Sable grossier	20 à 35 p. 1 000
Calcaire total	26 à 102 p. 1 000
pH (eau)	8 à 8,5

Le climat est caractérisé pour l'essentiel par les figures 1, 2 et 3 représentant la pluviométrie, les températures moyennes et l'évapotranspiration potentielle.

La pluviométrie moyenne est de l'ordre de 540 mm, l'évapotranspiration potentielle de 650 mm ; l'ensoleillement moyen est environ de 1 800 heures (E. N. S. A. Grignon, 1962).

L'ensemble des parcelles est cultivé en assolement biennal (plante sarclée, blé) ; les pailles de céréales et les verts de plantes sarclées sont toujours enlevés après les récoltes.

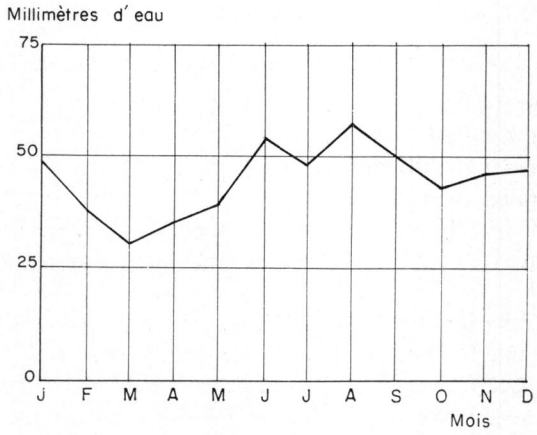
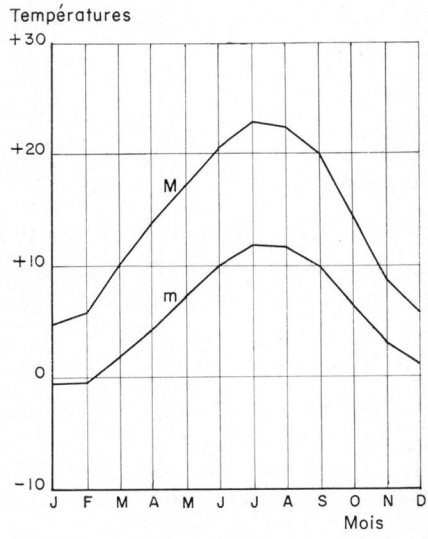


FIG. 1. — *Pluviométrie* (1947-1962)



Moyenne des minima : m
Moyenne des maxima : M

FIG. 2. — *Températures* (1947-1962)

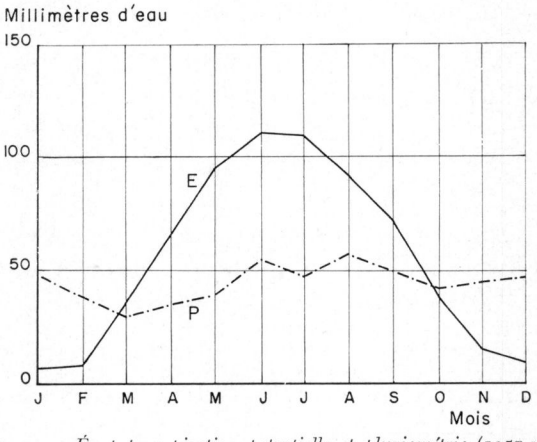


FIG. 3. — *Évapotranspiration potentielle et pluviométrie* (1957-1962)

Les différents traitements actuellement pratiqués sont les suivants :

Parcelles sans engrais depuis 1875.
Parcelles sans engrais depuis 1902.
Parcelles sans engrais depuis 1931.
Parcelles sans engrais depuis 1965.
Parcelles recevant une fumure minérale complète N. P. K. depuis 1902.
Parcelles sans engrais de 1902 à 1966, recevant une fumure minérale complète N. P. K. depuis 1967.
Parcelles recevant une fumure minérale N. K. sans P. depuis 1929.
Parcelles recevant une fumure minérale P. K. sans N. depuis 1929.
Parcelles recevant une fumure minérale N. P. sans K. depuis 1929.
Parcelles recevant exclusivement du fumier d'étable depuis 1929.
Parcelles recevant du fumier d'étable + N. P. K. depuis 1965.

Les quantités de substances fertilisantes appliquées par are et par an sont les suivantes :

Fumier d'étable : 100 kg.
N : 0,87 kg (ammonitrate),
P : 0,40 kg (superphosphate).
K : 0,75 kg (chlorure de potassium).

Les parcelles « fumier + N. P. K. » reçoivent 100 kg de fumier ; il leur est de plus apporté une fumure minérale complémentaire telle que la quantité totale de chacun des éléments soit égale aux quantités appliquées sur les parcelles N. P. K.

TECHNIQUES ANALYTIQUES ET RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Les résultats présentés dans ce mémoire concernent l'évolution des taux d'azote et de carbone dans différentes parcelles du champ pour une période de 24 années.

TABLEAU I

Évolution des taux d'azote entre 1938 et 1962

Traitements	Taux d'azote p. 1 000 de terre sèche			Diminution annuelle p. 100 d'azote initial		
	1938	1952	1962	1938-1952	1952-1962	1938-1962
Sans engrais depuis 1875	1,30	1,18	1,14	0,66	0,34	0,51
Sans engrais depuis 1902	1,40	1,31	1,23	0,46	0,61	0,51
Sans engrais depuis 1931	1,79	1,54	1,42	0,99	0,78	0,86
N. P. K. depuis 1902.....	1,50	1,38	1,38	0,57	0	0,33
N. K. depuis 1929.....	1,58	1,44	1,41	0,63	0,21	0,45
P. K. depuis 1929	1,65	1,44	1,37	0,91	0,49	0,71
N. P. depuis 1929	1,70	1,52	1,44	0,76	0,53	0,64
Fumier seul depuis 1929	1,66	1,62	1,57	0,17	0,31	0,23

L'azote total (méthode de KJELDAHL) et le carbone organique (méthode de P. ANNE, 1945) ont été déterminés sur des prélèvements de sol effectués en 1938, 1952 et 1962 sur les demi-parcelles cultivées en blé. La minéralisation est effectuée dans les conditions suivantes (échantillons de 1962) :

2 g de sol,
25 cm³ d'acide sulfurique pur,
3 g d'un catalyseur ainsi composé :
sulfate de potassium : 100 g
sulfate de cuivre : 100 g
sélénium : 20 g

Temps de chauffage : 1 h 15 mn (décoloration après 15 mn environ). Il a été vérifié que les résultats sont identiques à ceux obtenus par minéralisation prolongée avec catalyseur sans sélénium (déterminations de 1938 et 1952, MOREL et *al.*, 1956).

Les résultats obtenus, reproduits dans les tableaux 1 et 2, sont représentés sur la figure 4.

TABLEAU 2

Évolution du taux de carbone organique et du rapport C/N

Désignation des traitements	Taux de carbone p. 1 000 de terre sèche			Rapports C/N		
	1938	1952	1962	1938	1952	1962
Sans engrais depuis 1875	11,4	10,1	9,9	8,8	8,6	8,7
Sans engrais depuis 1902	12,2	11,3	10,9	8,8	8,7	8,9
Sans engrais depuis 1931	15,6	13,4	12,5	8,7	8,7	8,7
N. P. K. depuis 1902.....	13,0	12,1	12,1	8,7	8,8	8,8
N. K. depuis 1929.....	13,6	12,5	12,2	8,6	8,7	8,7
P. K. depuis 1929	14,3	12,8	12,1	8,8	8,9	8,8
N. P. depuis 1929	14,7	13,2	12,7	8,6	8,7	8,8
Fumier seul depuis 1929	14,6	14,5	14,0	8,7	9,0	8,9

Si nous exceptons les parcelles « fumier » et N. P. K., nous constatons que les taux d'azote et de carbone ont fléchi de façon significative soit entre 1938 et 1952, soit entre 1952 et 1962. La diminution est effective mais non significative dans les parcelles « fumier ». Les parcelles N. P. K. présentent les mêmes taux d'azote et de carbone en 1952 et 1962, ce qui indique qu'un équilibre est atteint.

Il est remarquable de constater que le rapport C/N varie très peu dans le temps et avec les divers traitements pratiqués : pour toutes les déterminations effectuées en 1938, 1952 et 1962, il se situe entre 8,6 et 9,0 (tabl. 2). Il semble bien que ce rapport tende vers une valeur sensiblement constante dans une situation pédo-climatique et culturale donnée, valeur peu affectée notamment par des conditions très diverses de fertilisation.

La constance du rapport C/N résulte d'une corrélation linéaire très étroite entre les taux des deux éléments dans le sol des différentes parcelles (coefficient de corrélation : 0,97) (fig. 5).

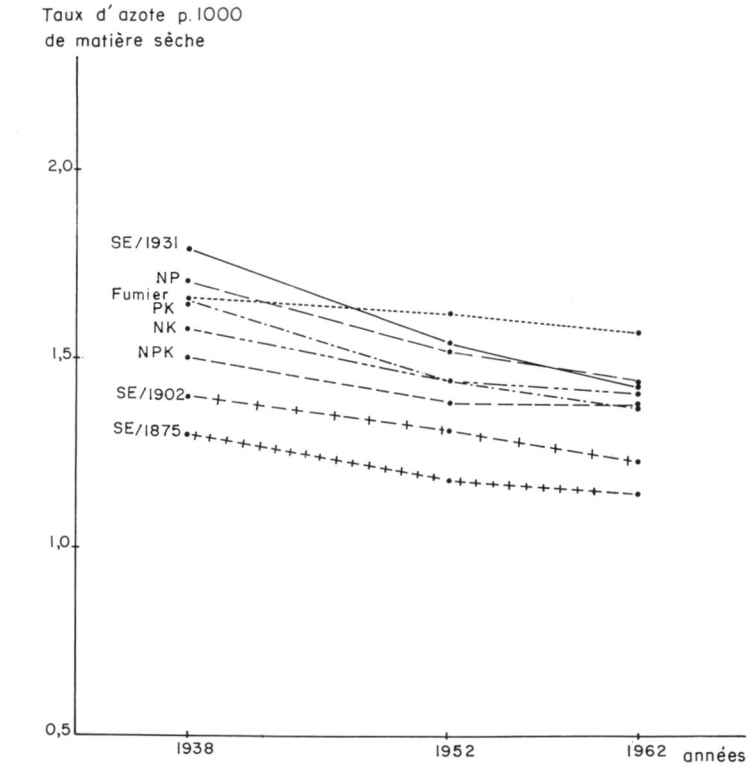


FIG. 4. — *Évolution du taux d'azote total entre* 1938 *et* 1952

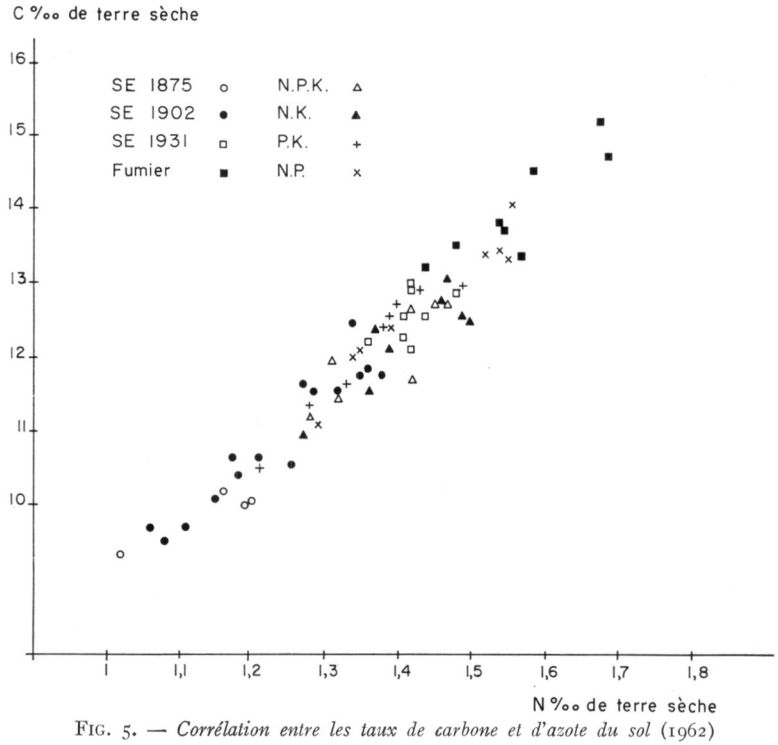


FIG. 5. — *Corrélation entre les taux de carbone et d'azote du sol* (1962)

VALEURS CARACTÉRISTIQUES RELATIVES A L'ÉVOLUTION DE L'AZOTE ORGANIQUE

Ces valeurs peuvent exprimer :

— la diminution annuelle du taux d'azote total qui traduit le résultat apparent de l'évolution de l'azote organique du sol, compte tenu des apports et des pertes relatifs à la couche de sol étudiée ;

— le taux de minéralisation annuel de l'azote organique du sol, défini ci-après.

Soit : N la quantité d'azote organique total du sol,

A la quantité d'azote apportée par are et par an qui se transforme en azote organique dans la couche de sol considérée. La relation suivante est habituellement utilisée pour exprimer le bilan de l'azote par unité de temps :

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = A - \alpha_1 N \qquad (1)$$

α_1 représente le taux de minéralisation réel de l'azote organique total par unité de temps.

Cette relation traduit l'hypothèse que l'ensemble des processus réactionnels de minéralisation de la matière organique relève d'une cinétique du premier ordre. Ce point de vue est sans aucun doute discutable ; nous l'admettrons en première approximation.

La relation (1) ne tient pas compte de la quantité d'azote minéralisée qui se réorganise. Nous supposerons que celle-ci demeure proportionnelle à la quantité minéralisée et qu'elle est en conséquence également proportionnelle à la masse d'azote organique total du sol. Le bilan de l'azote par unité de temps s'écrit alors :

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = A - \alpha_1 N + \alpha_2 N \qquad (2)$$

α_2 représente le taux de réorganisation par rapport à l'azote organique total, tel que $\alpha_2 < \alpha_1$.

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = A + (\alpha_2 - \alpha_1)N \qquad (3)$$

Si $\alpha_2 - \alpha_1 = -\alpha$, α étant une valeur positive, la relation devient :

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = A - \alpha N \qquad (4)$$

α est le taux de minéralisation apparent de l'azote organique total par unité de temps. C'est ce taux qui est habituellement utilisé, impliquant nécessairement les deux hypothèses faites *a priori* et précédemment énoncées. Remarquons enfin que le taux réel de destruction α_1 est supérieur au taux de destruction apparent α.

De la relation (4), écrite sous forme différentielle, il vient

$$\text{Log}\,\frac{\alpha N - A}{\alpha N_0 - A} = -\alpha t \qquad (5)$$

et

$$\frac{\alpha N - A}{\alpha N_0 - A} = e^{-\alpha t} \qquad (6)$$

expressions classiques dans lesquelles N_0 et N sont les quantités d'azote organique total au début et à la fin d'une période expérimentale de durée t.

Le calcul du taux de destruction apparent α peut être effectué, connaissant N_0, N, A et t.

La relation (6) peut s'écrire :

$$N = \frac{A}{\alpha} + \left(N_0 - \frac{A}{\alpha}\right) e^{-\alpha t} \tag{7}$$

Lorsque t devient très grand, le taux d'azote N tend vers une valeur déterminée

$$N\acute{e}q = \frac{A}{\alpha} \tag{8}$$

Cette valeur représente le niveau d'équilibre azoté qui, pratiquement, est atteint après une période expérimentale suffisamment longue. La relation (8) écrite sous la forme $A = \alpha N\acute{e}q$ (9) exprime que les gains sont égaux aux pertes.

Remarques.

1) Un calcul approché plus rapide permet d'atteindre une valeur de α très voisine de la précédente. Dans la relation (4) : $\Delta N = N - N_0$,
Δt est, exprimé en années, la durée de la période expérimentale considérée. N peut être choisi égal à la moyenne des quantités d'azote total prises au début et à la fin de la période étudiée.

Dans ces conditions, la relation (4) s'écrit :

$$\frac{N - N_0}{t} = A - \alpha \frac{(N_0 + N)}{2}$$

et

$$\alpha = \frac{2}{N_0 + N}\left(A + \frac{N_0 - N}{t}\right) \tag{10}$$

2) La minéralisation des différentes substances organiques du sol peut être rapide ou très lente, avec toutes les possibilités intermédiaires. Les calculs exposés sont effectués d'après le taux d'azote organique total. Les taux de minéralisation apparent et réel sont donc relatifs à l'ensemble des substances azotées du sol ; ils ne distinguent pas notamment les taux concernant les substances à minéralisation rapide et ceux correspondant aux substances à minéralisation lente.

TAUX DE MINÉRALISATION DE L'AZOTE ET DU CARBONE ORGANIQUES

Les taux annuels de minéralisation sont reproduits dans les tableaux 3 et 4. Pour l'azote, la valeur A est la quantité d'azote apportée qui se transforme dans la couche arable en azote organique. Elle est égale à la quantité d'azote apportée au sol, quelle que soit sa forme, multipliée par un coefficient que nous ne connaissons pas expérimentalement de façon directe : aussi, les calculs ont-ils été effectués avec deux valeurs plausibles de ce coefficient : 0,30 et 0,50 ; une justification de la dernière valeur indiquée est apportée dans un prochain paragraphe (p. 167).

En ce qui concerne le carbone, le raisonnement suivi pour l'azote n'est plus applicable : en effet, la quantité de carbone introduite dans le sol n'est pas constante ; généralement, elle diminue au fur et à mesure que la masse des résidus de récoltes s'amenuise. Nous pouvons cependant calculer un taux de minéralisation annuel moyen, comme il est précisé dans l'exemple suivant :

Parcelles P. K. depuis 1929, période 1938-1952

Carbone organique par are de couche arable

1938 : 14,3 × 30 = 429 kg
1952 : 12,8 × 30 = 384 kg — Moyenne : 406,5 kg

Diminution de la quantité de carbone organique : 45 kg
Poids des résidus de récoltes de 1938 à 1952 : 196 kg
Carbone des résidus de récoltes : 98 kg
Perte totale en carbone : 45 + 98 = 143 kg

Taux de minéralisation annuel p. 100 : $\frac{143 \times 100}{406{,}5 \times 14} = 2{,}51$

TABLEAU 3

Taux de minéralisation annuels apparents de l'azote (p. 100)

Traitements	1938-1952		1952-1962		1938-1962	
	A = 0,3	A = 0,5	A = 0,3	A = 0,5	A = 0,3	A = 0,5
Sans engrais depuis 1875	0,82	0,89	0,47	0,56	0,67	0,75
Sans engrais depuis 1902	0,59	0,65	0,75	0,83	0,65	0,73
Sans engrais depuis 1931	1,16	1,22	0,84	0,91	1,02	1,09
N. P. K. depuis 1902.....	1,29	1,75	0,72	1,21	1,04	1,50
N. K. depuis 1929.....	1,32	1,77	0,89	1,38	1,14	1,59
P. K. depuis 1929	1,07	1,13	0,60	0,68	0,87	0,94
N. P. depuis 1929	1,42	1,83	1,22	1,67	1,33	1,75
Fumier seul depuis 1929	0,57	0,84	0,72	0,99	0,63	0,90

Dans ces calculs, les résidus secs de blé sont estimés à 30 p. 100 de la somme grain + paille, les résidus secs de plante sarclée à 3 p. 100 du poids de racines fraîches récoltées. Tous ces résidus secs sont supposés contenir 50 p. 100 de carbone.

L'examen des taux de minéralisation fait ressortir la distinction importante qui marque le comportement du carbone et de l'azote organiques totaux. Le taux de minéralisation annuel du carbone est fonction, dans une assez large mesure, de la quantité de l'élément incorporée annuellement au sol. Le rapport $\frac{\text{perte annuelle totale de carbone}}{\text{apports annuels de carbone}}$, égal à 1 pour les parcelles N. P. K. en équilibre (période 1952-1962), apparaît d'autant plus grand que les parcelles sont plus éloignées dans le temps de cet état d'équilibre (tabl. 4).

Les taux de minéralisation apparent et réel de l'azote dépendent notamment de la proportion de substances organiques « anciennes », du rapport C/N des apports carbonés et azotés au sol et de l'importance de l'azote incorporé au sol sous forme organique (p. 168).

Il résulte de ces observations que le rapport des taux de minéralisation du carbone et de l'azote diminue avec le temps et varie avec les différents traitements (tabl. 4). Il est généralement compris entre 1,1 et 2,6 (période 1952-1962) ; il marque des singularités pour les parcelles « fumier » d'une part (apports de carbone élevés), pour les parcelles N. K. et N. P. d'autre part (voir p. 168 et 169).

TABLEAU 4

Taux de minéralisation du carbone organique et rapports divers

Traitements	Taux de minéralisation annuel moyen du carbone (p. 100)			Rapport de la perte annuelle aux apports annuels de carbone		Rapport des taux de minéralisation du carbone et de l'azote (1)	
	1938-1952	1952-1962	1938-1962	1938-1952	1952-1962	1938-1952	1952-1962
Sans engrais depuis 1875 ..	2,02	0,91	1,54	1,74	1,28	2,27	1,62
Sans engrais depuis 1902 ..	1,82	1,21	1,57	1,43	1,42	2,80	1,46
Sans engrais depuis 1931 ..	2,46	1,67	2,12	1,79	1,71	2,02	1,83
N. P. K. depuis 1902.....	3,16	2,26	2,75	1,19	1,0	1,81	1,87
N. K. depuis 1929	2,81	1,76	2,36	1,27	1,16	1,59	1,28
P. K. depuis 1929	2,51	1,79	2,21	1,46	1,46	2,22	2,63
N. P. depuis 1929	2,92	1,89	2,48	1,36	1,26	1,60	1,13
Fumier seul depuis 1929 .	5,31	5,30	5,30	1,01	1,07	6,32	5,35

(1) Il s'agit pour l'azote du taux de minéralisation annuel apparent.

ÉTUDE DES PARCELLES SANS ENGRAIS ET P. K.

Pour ces parcelles, le seul apport d'azote provient de l'atmosphère (pluies, fixation biologique) ; nous l'estimerons de l'ordre de 0,15 kilogramme par are et par an.

L'abaissement du taux d'azote est général pour les quatre types de traitements : sans engrais depuis 1875, 1902 et 1931, P. K. depuis 1929. L'évolution des taux d'azote dans les parcelles sans engrais permet, moyennant un ajustement pour les parcelles sans engrais depuis 1875, de tracer un graphe représentant l'allure du phénomène dans le temps (fig. 6).

Ce graphe montre que les taux d'azote des parcelles sans engrais continuent à s'abaisser ; l'équilibre n'est pas atteint, notamment pour les parcelles sans engrais depuis 1875.

Le taux de minéralisation apparent de l'azote peut être évalué, connaissant A (relations 6 ou 10) ; le tableau 5 donne, pour diverses valeurs de A comprises entre 0,04 et 0,10 kg par are, les valeurs de α pour différentes périodes.

La valeur de A, faible par rapport à la masse totale d'azote du sol, influe peu sur le coefficient α. Pour A donné, α décroît avec le temps d'expérimentation. Ce fait est dû à ce que la proportion relative d'azote organique « jeune », présentant un taux de minéralisation élevé, diminue avec le temps dans les parcelles considérées ; parallèlement, la proportion d'azote organique « ancien » en partie associé avec la fraction minérale du sol augmente alors que son coefficient α s'abaisse.

L'ordre de grandeur actuel du taux de minéralisation apparent de l'azote organique pour les parcelles sans engrais depuis 1875 et 1902 est compris entre 0,6 et 0,8 p. 100. Cette valeur s'élève à 1,2 ou 1,3 p. 100 au cours des premières années du traitement sans engrais (parcelles sans engrais depuis 1931, période 1938-1952).

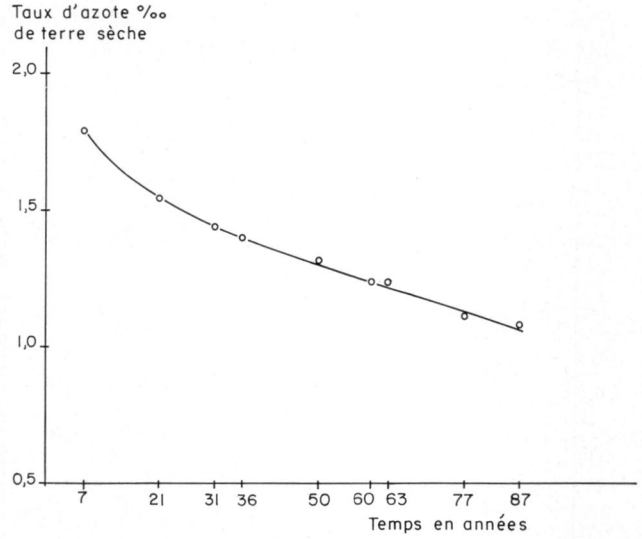


FIG. 6. — *Évolution dans le temps du taux d'azote total dans les parcelles sans engrais*

TABLEAU 5

Valeurs de α en fonction de A

Désignation des traitements	Valeurs de A			
	0,04	0,06	0,08	0,10
Sans engrais depuis 1875 (1938-1962)	0,0061	0,0067	0,0073	0,0078
Sans engrais depuis 1902 (1938-1962)	0,0061	0,0066	0,0071	0,0076
Sans engrais depuis 1931				
1938-1952	0,0115	0,0120	0,0124	0,0128
1952-1962	0,0083	0,0087	0,0092	0,0096
1938-1962	0,0102	0,0106	0,0110	0,0115

Les valeurs de A et de α devraient permettre de calculer le niveau d'équilibre azoté des parcelles sans engrais. Toutefois, la valeur de A n'est pas connue de façon précise ; le calcul reste aléatoire. Si nous supposons $A = 0{,}075$ et $\alpha = 0{,}007$, la quantité d'azote à l'équilibre serait de 10,7 kg par are, ce qui correspond à un taux d'azote

du sol de 0,36 p. 1 000. Mais nous ignorons aussi si le coefficient α, apparemment constant actuellement pour les parcelles sans engrais depuis 1875 et 1902, ne s'abaissera pas encore ; le niveau d'équilibre azoté serait alors plus haut.

Les parcelles P. K. depuis 1929 et sans engrais depuis 1931 ont des taux de minéralisation voisins. Cette analogie est révélée plus nettement encore en comparant trois parcelles de chacun des deux types de traitements présentant en 1938 les mêmes taux moyens d'azote et de carbone : l'évolution de ces taux entre 1938 et 1962 est identique dans les deux cas (tabl. 6).

TABLEAU 6

Comparaison des taux d'azote et de carbone de trois parcelles des traitements sans engrais depuis 1931, P. K. depuis 1929

	1938	1952	1962
Azote (p. 1 000)			
Sans engrais depuis 1931 ..... (parcelles 14, 16, 54)	1,69	1,51	1,41
P. K. depuis 1929 ..... (parcelles 68, 48, 73)	1,69	1,51	1,41
Carbone (p. 1 000)			
Sans engrais depuis 1931	14,5	13,2	12,6
P. K. depuis 1929	14,5	13,3	12,5

Tout se passe comme si l'apport de phosphore et de potassium n'avait actuellement pas d'influence. Ce fait s'explique par une richesse naturelle du sol assez élevée en ces deux éléments. Le manque d'azote dans la fumure demeure dans ce cas le facteur essentiel de l'abaissement du taux d'azote total et de carbone du sol.

ÉTUDE DES PARCELLES RECEVANT UNE FUMURE MINÉRALE AZOTÉE

(Parcelles N. P. K., N. P., N. K.)

Ces parcelles reçoivent par are et par an la même quantité d'azote minéral, 1 kg environ, compte tenu des apports en provenance de l'atmosphère. Leurs taux de minéralisation apparents de l'azote sont voisins.

Les parcelles N. P. K. sont en équilibre azoté et carboné. Cependant, entre 1938 et 1952, un abaissement notable du taux d'azote ne laissait pas prévoir un état d'équilibre aussi proche, peut être dû à des conditions climatiques particulières à la période considérée.. Il est certain que pour être définitivement assuré de cet état, plusieurs déterminations analytiques faites à intervalles suffisamment longs seront nécessaires.

Mises en expérience 27 ans plus tard, les parcelles N. P. et N. K. ont des taux d'azote et de carbone qui continuent à décroître ; nous étudierons leur comportement dans la seconde partie de ce paragraphe et examinerons en premier lieu les parcelles N. P. K.

Parcelles N. P. K.

Avec une fumure exclusivement minérale poursuivie pendant 50 années, un équilibre azoté et carboné paraît atteint. Les restitutions au sol sont cependant très modérées (16,4 kg de résidus secs par are et par an) ; le rapport :

$$\frac{\text{carbone organique total}}{\text{apport annuel de carbone organique}}$$ est 44, valeur particulièrement élevée.

L'état d'équilibre des parcelles N. P. K. nous permet d'apporter quelques données quantitatives sur la dynamique des substances carbonées et azotées du sol. Remarquons qu'il est plus facile d'aborder la question par l'étude de l'azote que par celle du carbone : ce dernier disparaît en effet à divers stades de son évolution sous forme de gaz carbonique d'un accès analytique difficile dans les conditions naturelles ; l'azote, au contraire, demeure pour sa fraction la plus importante sous forme de composés organiques ou minéraux non fugaces.

Nous avons donné (tabl. 3 et 4) des taux de minéralisation du carbone et de l'azote organiques. En ce qui concerne l'azote, le coefficient A a été affecté des valeurs 0,30 et 0,50 ; la dernière valeur est précisément obtenue par les considérations que nous développons ci-après.

L'équilibre observé dans les parcelles N. P. K. devrait, semble-t-il, permettre d'accéder aisément au taux de minéralisation annuel de l'azote ; en effet, dans cette situation particulière, les pertes sont égales aux gains et permettent de déduire la proportion de l'azote organique du sol minéralisée pendant une période donnée. Toutefois, l'évaluation des gains d'azote organique du sol n'est pas possible. Cet azote peut provenir des résidus de récoltes (0,25 kg par are et par an) mais ce n'est pas là sa seule origine : la micropopulation du sol participe également à l'édification des structures azotées organiques. De plus, une fraction de l'azote minéralisée est réorganisée. Aussi, un taux de minéralisation calculé en admettant que les gains d'azote organique s'effectuent sans perte aux dépens de l'azote des seuls résidus de récoltes — 0,6 p. 100 — représente-t-il une valeur inférieure à la valeur réelle.

Une seconde indication peut être recherchée en considérant le carbone organique du sol. Pour une fraction importante des substances organiques à la fois carbonées et azotées, nous pouvons penser que le carbone et l'azote sont minéralisés simultanément avec des vitesses voisines. Le carbone organique provient pour sa quasi totalité des résidus de récoltes dont nous connaissons une estimation annuelle. Mais d'une part, une partie de ce carbone est utilisée à des fins énergétiques principalement par la micropopulation du sol et se trouve dissipée sous forme de gaz carbonique sans participer à l'édification des structures organiques. D'autre part, de petites molécules carbonées, formées au cours de la minéralisation (acides aminés par exemple) peuvent être utilisées pour reconstruire les structures complexes organiques. Le taux de minéralisation du carbone, calculé d'après les apports par les résidus de récoltes — 2,3 p. 100 — ne saurait donc représenter qu'une valeur approximative du taux de minéralisation réel annuel de l'azote.

Il semble possible de mieux approcher ce taux en considérant le comportement d'autres parcelles du champ ; une comparaison peut en particulier être faite avec les parcelles ne recevant pas d'engrais azotés : les taux de minéralisation apparents de l'azote ont été déterminés et nous avons remarqué pour ces traitements que la valeur A intervenait peu dans les résultats (tabl. 5). La référence la plus valable se rapporte aux parcelles sans engrais depuis 1931 et aux parcelles P. K. depuis 1929, observées au début de leurs traitements respectifs (période 1938-1952). Il est difficile d'imaginer que le taux annuel de minéralisation de l'azote dans les parcelles N. P. K. puisse être inférieur à celui des parcelles sans engrais : dans les premières, l'azote organique est en renouvellement constant et quantitatif ; dans les secondes, la proportion d'azote difficilement minéralisable augmente avec le temps et le taux de minéralisation diminue progressivement (tabl. 3 et 5). Pour les parcelles sans engrais depuis 1929 et 1931, le taux de minéralisation apparent de l'azote, α, est de l'ordre de 1,2 à 1,3 p. 100 (tabl. 5) ; le taux réel α_1 est plus élevé (p. 159) ; si $\frac{\alpha_2}{\alpha_1} = p$ représente la proportion de l'azote minéralisé qui se réorganise, α_1 est donné par la relation :

$$\alpha_1 = \frac{\alpha}{1 - p}$$

Le tableau ci-dessous donne les valeurs de α_1 pour $\alpha = 1{,}25$ p. 100 et p variant de 0,1 à 0,6. Si nous supposons qu'un tiers de l'azote minéralisé est réorganisé, le taux de minéralisation annuel réel de l'azote organique se situerait aux environs de 2,0 p. 100.

Valeurs de p	Valeurs de α_1
0,1	0,39
0,2	1,56
0,3	1,79
0,4	2,08
0,5	2,50
0,6	3,12

Le taux de minéralisation apparent — 1,25 p. 100 — permet de déduire que 0,52 kg d'azote est apparemment minéralisé ou organisé. Or, l'azote des résidus de récoltes, seul, ne peut permettre la production que de 0,25 kg d'azote organisé. Il ne fait aucun doute que le complément a pour origine l'azote minéral apporté au sol ; organisé par la micropopulation du sol sans passer par l'intermédiaire de la plante, il contribue pour une part importante à l'édification des structures organiques azotées du sol ; cette part peut être évaluée à 50 p. 100 environ si nous admettons que la transformation de l'azote des résidus de récoltes s'effectue sans pertes.

Niveau d'équilibre organique azoté du sol.

Le paragraphe précédent montre que la quantité d'azote organique du sol n'est pas uniquement fonction de la masse de résidus laissés par les récoltes. Il paraît intéressant de rechercher un facteur plus décisif dont dépendrait, à l'équilibre, le niveau organique azoté du sol. La quantité d'azote total apportée au sol par unité de temps, quelle qu'en soit la forme, semble présenter le plus d'intérêt.

En effet, d'une part, la matière organique du sol contient à l'équilibre et dans des conditions déterminées, une quantité d'azote constante qui doit nécessairement être fournie au sol. D'autre part, pour une proportion importante, la matière organique a comme origine directe les microorganismes du sol. Or, si les conditions énergétiques sont satisfaites, l'azote est l'un des facteurs déterminants de la prolifération et de l'activité microbiennes, comme il demeure aussi l'un des facteurs essentiels de la production végétale.

Si nous appliquons aux parcelles N. P. K. le raisonnement tenu pour les parcelles sans engrais, le niveau d'équilibre est donné par la relation

$$N_{eq} = \frac{A}{\alpha} \qquad (8)$$

A et α ayant les significations précédemment définies.

Nous serions ainsi en mesure de calculer le taux d'azote du sol à l'équilibre connaissant A et α ; nous avons dans le cas des parcelles N. P. K. suggéré un ordre de grandeur de α par analogie. Malheureusement, la valeur de A reste imprécise.

Nous avons évalué les pertes annuelles d'azote entre 1952 et 1962 à 0,52 kg ; cette quantité représente aussi la valeur de A (relation 9). L'azote total apporté au sol étant 1 kg par an environ, la proportion de cet azote qui s'est transformé en azote organique a été pour la période considérée de l'ordre de 50 p. 100.

Remarquons que, le sol étant en équilibre, 0,52 kg d'azote est en retour fourni par la minéralisation. En définitive, la couche arable dispose de 1 kg d'azote minéral qui se répartit entre les pertes et le prélèvement correspondant aux parties aériennes des plantes. Du point de vue de la disponibilité totale annuelle d'azote par les végétaux, tout se passe dans un sol en équilibre comme si le stock de substances azotées organiques se trouvait hors circuit.

Parcelles N. P. et N. K.

En 1962, les taux d'azote et de carbone sont encore légèrement supérieurs à ceux des parcelles N. P. K. en équilibre ($N_{eq.} = 1{,}38$, $C_{eq.} = 12{,}1$). Nous ignorons si ces taux se stabiliseront aux niveaux $N_{eq.}$ et $C_{eq.}$; cela soulignerait dans ce cas le rôle actuel très discret du phosphore et du potassium sans pour autant préjuger bien entendu de ce rôle dans l'avenir. Le niveau d'équilibre dépendrait essentiellement de la quantité d'azote minéral apportée au sol et serait indépendant de la masse des résidus de récoltes : celle-ci est actuellement pour les parcelles N. P. et N. K. environ les deux tiers de celle des parcelles N. P. K.

Mais il est plus vraisemblable que le taux d'azote, notamment, se stabilise au-dessous de $N_{eq.}$: en 24 ans, il est déjà voisin de cette valeur qui, pour les parcelles N. P. K. n'a été atteinte qu'après 50 années. De plus, le taux de minéralisation apparent de l'azote des parcelles N. P. et N. K. est très nettement supérieur à celui des parcelles P. K. ; il est également plus élevé que celui des parcelles N. P. K. ; il semble donc que le taux d'azote s'abaissera encore dans l'avenir.

Dans ce cas, nous ne pourrions plus dire que le taux d'équilibre est essentiellement fonction de la seule quantité d'azote apportée au sol, infirmant par là l'idée que nous avions précédemment proposée. Puisque le phosphore et le potassium ne paraissent pas actuellement jouer un rôle important, une explication est à rechercher. La notion de facteurs limitants, appliquée à l'azote et au carbone, peut, semble-t-il, répondre à la question posée (p.171).

ÉTUDE DES PARCELLES RECEVANT UNIQUEMENT DU FUMIER D'ÉTABLE

Entre 1938 et 1962, la diminution du taux d'azote de ces parcelles n'est pas significative ; l'état d'équilibre semble proche d'être atteint. Mais il n'est pas impossible aussi que cette lente décroissance du taux d'azote puisse se poursuivre pendant longtemps.

L'abaissement très lent du taux d'azote dans les parcelles « fumier » est à opposer à une diminution beaucoup plus rapide observée dans les parcelles N. K. et N. P. qui reçoivent cependant plus d'azote. Avant d'atteindre leur équilibre, les parcelles N. P. K. présentaient également un fléchissement plus rapide. Diverses considérations peuvent expliquer ces différences de comportement.

Nous connaissons l'effet favorable de l'azote dans la première phase de la dégradation d'une matière organique de rapport C/N élevé ; cette action tient au fait que l'azote est un élément fondamental, nécessaire à la vie des microorganismes qui en contiennent un taux bien déterminé. Un manque d'azote, même relatif comme dans le fumier, devient un obstacle à la multiplication microbienne et, par là, à la minéralisation. Cet argument peut partiellement expliquer le lent abaissement du taux d'azote dans les parcelles « fumier ». Toutefois, la diminution de ce taux entre 1938 et 1952 par exemple, est trois à cinq fois plus faible que pour les parcelles recevant de l'azote minéral, alors que les apports ne diffèrent pas dans cette proportion ; ils sont de 0,65 kg d'azote par are et par an au lieu de 1 kg si nous tenons compte des apports en provenance de l'atmosphère.

Nous pouvons aussi remarquer que le fumier contient déjà une certaine quantité de substances « humiques » ou « préhumiques » : il en résulte qu'une partie de l'azote, déjà fixée dans des molécules complexes, n'est plus que faiblement soumise à un drainage éventuel.

En ce qui concerne les parties non encore humifiées, nous suggérons une idée qui fait apparaître un aspect particulier de la dynamique de la matière organique dans le sol : l'étude de l'évolution de celle-ci dans un volume très petit, à l'échelle des dimensions cellulaires ; cet aspect permet également de comprendre l'abaissement plus rapide du taux d'azote total dans les parcelles « N. P. K. » exclusivement fertilisées avec des engrais chimiques.

Dans le fumier, tout l'azote non déjà humifié demeure inclus dans la matière organique incorporée au sol ; les microorganismes qui attaquent cette matière organique trouvent au point même où ils se développent l'azote et les substances carbonées indispensables : tout l'azote peut être réorganisé et les causes de pertes réduites au minimum. Dans les parcelles recevant uniquement des engrais chimiques, au contraire, la distribution de l'engrais, nécessairement hétérogène, ne place pas toujours l'azote minéral au voisinage d'un point riche en substances carbonées rapidement disponibles. Les microorganismes peuvent alors en certains sites trouver tout l'azote qui leur est indispensable sans être en mesure de se procurer aisément une quantité suffisante de carbone ; leurs besoins structuraux et énergétiques ne sont pas entièrement satisfaits ; leur développement se trouve ralenti.

En d'autres termes, l'azote minéral apporté apparaît moins efficace que l'azote du fumier en ce qui concerne les processus d'organisation. A quantités égales d'azote apportées au sol, le fumier donnerait à la constante A des relations (1) à (10) une valeur plus grande que dans le cas des engrais chimiques ; il en résulterait un niveau d'équilibre plus élevé (relation 8) si par ailleurs le taux de minéralisation apparent α demeurait dans les deux cas le même.

BESOINS EN CARBONE DES SOLS. FACTEURS LIMITANTS DE LA FORMATION DE MATIÈRE ORGANIQUE

Comme l'azote, le carbone joue un rôle essentiel dans l'édification des structures de la matière vivante puis de la matière organique inerte du sol ; mais de plus, les propriétés exceptionnelles de cet élément lui confèrent un rôle capital dans tous les processus libérateurs d'énergie : énergie nécessaire à l'entretien de la vie des cellules vivantes ; énergie requise pour assurer dans le sol la synthèse de substances humiques à partir de molécules plus simples grâce à des réactions chimiques ou biochimiques. Par rapport à la quantité de carbone organisée dans le sol par unité de temps, un supplément doit être apporté, dont l'importance est difficile à évaluer.

Il semble par contre possible d'estimer les besoins totaux en carbone du sol en fonction des quantités d'azote reçues.

Nous nous référerons dans ce but aux parcelles N. P. K. ; nous ferons l'hypothèse que dans la situation d'équilibre observée entre 1938 et 1952 pour ces parcelles, les quantités de carbone consommées ont été au cours de cette période exactement adaptées aux quantités d'azote utilisées. Le rapport C/N des apports de carbone et d'azote mis en œuvre dans la couche arable précise la proportion cherchée de ces deux éléments ; il a pour valeur $\frac{8{,}20}{0{,}50} = 16{,}4$. Pour étendre le raisonnement aux autres types de traitements, nous évaluerons les besoins annuels en carbone entre 1938 et 1952 en multipliant par 16,4 la quantité d'azote apportée susceptible d'être organisée dans la couche arable et que nous avons désignée par A. Cette façon de procéder est suggérée par l'observation que le rapport C/N des sols des différentes parcelles tend pour tous les traitements pratiqués vers une valeur sensiblement uniforme de l'ordre de 8,8 ; dès lors, il est permis de supposer qu'une même finalité doit, en première approximation, entraîner à l'origine les mêmes besoins relatifs en azote et en carbone.

Nous considérerons que la quantité A est égale, comme pour les parcelles N. P. K., à 50 p. 100 de l'azote incorporé au sol. Pour chaque type de traitement, un bilan du carbone peut être établi, reproduit sur le tableau 7.

Deux types de parcelles révèlent des déficits en carbone : les parcelles N. P. et N. K. ; la quantité de carbone des résidus de récoltes est insuffisante pour assurer la formation de la matière organique correspondante à la quantité d'azote disponible dans la couche arable ; de l'azote est inutilisé, éliminé sans doute par drainage. Le taux de minéralisation de la matière organique, établi d'après l'étude des taux d'azote total, se trouve de ce fait augmenté (tabl. 3). Pour tous les autres traitements, la quan-

TABLEAU 7

Bilans du carbone (1)

Traitements	Apports annuels d'azote	Quantités annuelles d'azote organisées (2)	Résidus de récoltes par an 1952-1962	Apports annuels de carbone	Rapports C/N des apports	Besoins totaux en carbone organique	Bilans du carbone	Facteur limitant suggéré
Sans engrais depuis 1875	0,15	0,075	4,2	2,1	28	1,2	+ 0,9	N
Sans engrais depuis 1902	0,15	0,075	5,7	2,85	38	1,2	+ 1,65	N
Sans engrais depuis 1931	0,15	0,075	7,6	3,8	51	1,2	+ 2,6	N
N. P. K. depuis 1902.....	1,0	0,50	16,4	8,2	16,4	8,2	0	
N. K. depuis 1929	1,0	0,50	11,2	5,6	11,2	8,2	— 2,6	C
P. K. depuis 1929	0,15	0,075	9,2	4,6	61	1,2	+ 3,4	N
N. P. depuis 1929	1,0	0,50	11,7	5,85	11,7	8,2	— 2,35	C
Fumier seul depuis 1929	0,65	0,32	42,4(3)	21,2	66	5,2	+16	N

(1) Les quantités et les apports sont exprimés en kilogrammes par are de couche arable.
(2) Quantités calculées avec A = 0,50.
(3) Résidus de récoltes + fumier.

tité de carbone est en excès, donc suffisante par rapport aux taux d'azote. L'azote demeure pour ces parcelles le facteur essentiel de la quantité de matière organique produite, comme il a été indiqué dans un précédent paragraphe.

Ainsi, selon les cas, l'azote ou le carbone peuvent jouer le rôle de facteurs limitants de la production de matière organique ; les calculs indiqués permettent de suggérer le facteur limitant correspondant à chaque type de traitement (tabl. 7) ; ils donnent aussi une explication de l'anomalie apparente relevée pour les parcelles N. P. et N. K. (p. 167).

Il est également possible de rechercher le facteur limitant en comparant les rapports C/N des substances mises en œuvre dans la couche arable en choisissant comme référence le rapport C/N relatif aux parcelles N. P. K. : celles-ci étant en équilibre, nous pouvons penser que l'azote et le carbone apportés dans la couche arable sont dans un rapport convenable pour satisfaire aux besoins du sol (rapport C/N = 16,4). Lorsque le rapport C/N est plus élevé que 16,4, l'azote représente le facteur limitant ; s'il est plus bas, le carbone devient ce facteur (traitements N. P. et N. K.).

Enfin, l'insuffisance des résidus de récoltes se remarque dans les taux de minéralisation du carbone (tabl. 4) : ceux-ci sont plus faibles pour les parcelles N. P. et N. K. que pour les parcelles N. P. K. ; l'inverse apparaît pour les taux de minéralisation apparents de l'azote.

Ainsi, d'une façon générale, la genèse d'une quantité déterminée de matière organique dans le sol requiert une quantité minima de carbone.

— Si ce « seuil carboné » n'est pas atteint, une fraction de l'azote disponible demeure inutilisée et peut être éliminée par drainage.

— Si ce seuil est atteint ou dépassé, tout l'azote minéral disponible dans la couche de sol considérée semble susceptible d'être incorporé dans la matière organique par l'intermédiaire de la micropopulation du sol. Toutefois, certaines conditions peuvent limiter cette incorporation :

— un drainage rapide de l'azote minéral dans les couches inférieures,

— un abaissement local de la quantité de matière organique fraîche : le taux de carbone organique aisément libérable devient inférieur au seuil carboné dans un volume qui peut être éventuellement très petit. Aussi, lorsque la quantité de matière organique fraîche introduite dans le sol est peu importante, les risques de pertes d'azote sont-ils d'autant plus grands que la répartition de cette matière organique est plus hétérogène. Il n'est pas impossible que ces conditions puissent se rencontrer dans la pratique courante : il suffit que les restitutions organiques soient faibles et les apports d'azote minéral élevés.

CONCLUSIONS

Le fait le plus saillant de cette étude est la constatation d'un état d'équilibre azoté et carboné dans les parcelles recevant exclusivement des engrais minéraux depuis 1902 ; dans ces parcelles, l'azote des résidus de récoltes seuls est en quantité très insuffisante pour justifier le niveau d'équilibre atteint. Celui-ci est plus vrai-

semblablement dépendant de l'importance des apports d'azote minéral ; par l'intermédiaire de la micropopulation du sol, ces apports contribuent dans une large mesure à la formation de la matière organique dans son ensemble. Dès lors, les résidus de récoltes apparaissent plus comme des fournisseurs de carbone et d'énergie que comme un facteur direct de l'édification des structures organiques. Aussi un « seuil carboné » est-il nécessaire pour assurer l'organisation de l'azote apporté au sol avec le maximum d'efficacité ainsi que le montre le comportement des parcelles N. P. et N. K.

Les parcelles sans engrais depuis 1875, ne recevant que de faibles quantités d'azote en provenance de l'atmosphère, doivent avoir un niveau d'équilibre très bas, qui n'est actuellement pas atteint ; les parcelles N. P. K., au contraire, recevant beaucoup plus d'azote, semblent parvenues à un équilibre après 50 années seulement.

L'azote incorporé au sol sous une forme organique, et de ce fait étroitement associé au carbone, est plus efficace que l'azote minéral employé seul dans l'édification des structures organiques, comme le révèlent les parcelles recevant exclusivement du fumier d'étable depuis 1929.

Reçu pour publication en janvier 1968.

SUMMARY

EVOLUTION OF THE NITROGEN AND ORGANIC CARBON
IN THE SOIL OVER A LONG-TERM EXPERIMENT

The total nitrogen and organic carbon contents were determined from soil sampled in plots (in 1938, 1952 and 1962) which had been differently fertilized as follows : no fertilizer brought in since 1875, 1902 and 1931, full mineral NPK fertilization since 1902, NP, NK, and PK fertilization since 1929, farmyard manure only since 1929.

The degree of mineralization of both organic nitrogen and carbon is shown for each type of plot.

The C/N ratio remains approximately constant with time and for the various fertilizing treatments (8.6 to 9.0). Apparently, under given pedologic, climatic and cultural conditions, this ratio tends towards a value independant from fertiligation.

In 1952, the plots unfertilized since 1875, 1902 and 1931 were not in organic balance : their organic nitrogen and carbon contents were still decreasing while, conversely, the NPK plots had then reached the point of nitrogen and carbon balance. In these plots, the nitrogen from the harvest residues cannot, by itself, account for the balance level noted ; this shows clearly that the mineral nitrogen brought in plays a major part in the formation of organic matter through the instrumentality of the micropopulation, by-passing the plant altogether.

Assuming that, in the NPK plots which are in nitrogen and carbon balanee, the amounts of carbon consumed match exactly the nitrogen amounts brought into the soil, evaluations are made according to the type of fertilizer used.

These evaluations show that both nitrogen and carbon may act as limiting factors in the origination of the organic matter in the soil. Thus, in the NP and NK plots, the amount of carbon brought in by the harvest residues is inadequate : the « carbon threshold » is not reached.

When carbon is not the limiting factor, the amount of organic matter, elaborated in the investigated plots, is linked with the amount of nitrogen brought in, in whatever form the latter may be. However, the efficiency of nitrogen in the formation of organic matter is increased when brought in organic form as is established in the plots solely fertilized with farmyard manure ; a tentative explanation of this fact is suggested.

ZUSAMMENFASSUNG

EVOLUTION DES STICKSTOFFES UND DES ORGANISCHEN KOHLENSTOFFES DES BODENS IM LAUFE EINES DAUERVERSUCHES

Der gesamte Stickstoff und der organische Kohlenstoff wurden in Bodenproben festgestellt, die in den Jahren 1938, 1952 und 1962 aus verschieden gedüngten, kultivierten Parzellen entnommen wurden, nämlich : ohne Dünger seit 1875, 1902 und 1931 ; vollständige mineralische Düngung NPK seit 1902 ; mineralischen Düngung NP, NK, und PK seit 1929 ; ausschliesslich Stallmist seit 1929.

Die Mineralisierungsraten des organischen Stickstoffes und des Kohlenstoffes werden für jeden Parzellentypus angegeben.

In Abhängigkeit von der Zeit und für die verschiedenen Behandlungen (8,6 bis 9,0), bleibt das Verhältnis C/N nahezu unverändert. Es scheint, dass, unter bestimmten Kultur-und pedoklimatischen Bedingungen, dieses Verhältnis nach einem von der praktizierten Düngung unabhängigen Wert strebt.

Die seit 1875, 1902 und 1931 ungedüngten Parzellen wiesen im Jahre 1952 kein organisches Gleichgewicht auf : ihre Raten an organischem Stickstoff und Kohlenstoff nehmen weiter ab. Die NPK Parzellen, erreichten dagegen im Jahre 1952 ein Gleichgewicht bezüglich Stick- und Kohlenstoff. In diesen Parzellen, kann der Stickstoff der Ernterückstände allein das beobachtete Gleichgewichtsniveau nicht rechtfertigen. Es wird nachgewieesn, dass der beigebrachte mineralische Stickstoff bei der Bildung des organischen Materials weitgehend unter Vermittlung der Bodenmikropopulation beteiligt ist, ohne Hilfe der Pflanze.

Von der Hypothese ausgehend, dass in den NPK Parzellen, (deren Stick- und Kohlenstoffgehalt sich im Gleichgewicht befinden) die verbrauchten Kohlenstoffmengen genau den Stickstoffmengen, welche dem Boden zu geführt worden sind, angepasst sind, wurden Bilanzen für die verschiedenen Behandlungen aufgestellt.

Sie zeigen, dass Kohlenstoff oder Stickstoff, der ein oder der ander die Rolle eines begrenzenden Faktors im Werdegang der organischen Bodensubstanzen spielen können. In den NP und NK Parzellen ist also die durch die Ernteräckstünde zugebrachte Kohlenstoffmenge ungenügend; die « Kohlenstoff-Schwelle » wird nicht erreicht.

Tritt der Kohlenstoff nicht als der begrenzende Faktor auf, so scheint die in den untersuchten Parzellen erzeugte Menge an organischem Material an den Umfang der Stickstoffzufuhr gebunden zu sein, welches auch immer die Zuführungsart sein mag. Ist das Düngmaterial jedoch organischer Art, so wächst seine Wirkung beim Werdegang des organischen Materials an, was bei den ausschliesslich mit Stallmist versorgten Parzellen festgestellt wurde. Eine Erklärung dieser Tatsache wird vorgeschlagen.

РЕЗЮМЕ

Эволюция азота и органического углерода почвы в условиях длительного эксперимента.

Р. МОРЕЛЬ

Автор провел определения общего азота и органического углерода в образцах почв взятых в 1938, 1952 и 1962 годах с культивируемых делянок получавших различное удобрение : без удобрения с 1875, 1902 и 1931-го года, с полным удобрением NPK с 1902-го года, с минеральным удобрением NP, NK и PK с 1929-го года, делянки удобренные исключительно навозом с 1929-го года.

Процентные количества минерализованных азота и органического углерода указаны для каждого типа делянок.

Соотношение C/N остается более или менее постоянным во времени и для различных способов удобрения (8,6-9,0); в данных почвенно-климатических и агротехнических условиях это соотношение имеет как-будто тенденцию к превращению в независимую от применявшегося удобрения величину.

В делянках не получавших удобрения с 1875, 1902 и 1931-го годов не наблюдалось органического равновесия в 1952-м году : процентное содержание в них азота и органического углерода продолжает уменьшаться; и напротив, делянки получавшие NPK в 1952 достигли равновесия. В этих делянках уровень наблюдаемого равновесия нельзя об'яснить только азотом пожнивных растительных остатков; автор доказывает что подкормки минеральным азотом в широкой мере способствуют образованию органического вещества при помощи микрофлоры почвы, без участия растения.

С помощью гипотезы о том что в делянках NPK, находящихся в состоянии азотного и углеродного равновесия, количества израсходованого углерода находятся в прямой зависимости от количеств внесенного в почву азота, автор составляет балансы различных способов удобрения.

Он доказывает что углерод или азот могут играть роль ограничивающих факторов в генезисе органических веществ почвы. Например, в делянках NP и NK массы углерода принесенного пожнивными остатками — недостаточно; « порог углерода » не достигнут.

В случаях когда углерод не является ограничивающим фактором, количество сформированного органического вещества связано, по всей вероятности, с размерами азотных подкормок, какова бы ни была форма внесенного азота. Однако, эффективность азота в генезисе органического вещества увеличивается если он внесен в органической форме, как это было констатировано в делянках получавших только навоз; автор предлагает об'яснение этого факта.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier particulièrement MM. Barbier, Henin, Lefèvre, Monnier et Turc de l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail et des échanges de vues fructueux qu'ils m'ont permis d'avoir à son sujet.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Anne P., 1945. Surl e dosage rapide du carbone organique des sols. *Ann. agron.*, **15**, 161-172.

Chaire d'agriculture de l'E. N. S. A. de Grignon, 1962. Le climat de Grignon. *Fascicule du Centre de Recherches et d'Expérimentation.*

Dehérain P. P. et coll., 1876. Station agronomique de Grignon. Cultures du champ d'expériences. *Ann. agron.*, **2**, 95-107.

Morel R., Richer A., Masson P., 1956. Étude expérimentale de la variation du taux de matière organique du sol dans le champ d'expériences de la Station agronomique de Grignon. *Ann. agron.*, **7**, 183-204.

Ann. agron., 1968, **19** (2), 175-246.

RECHERCHES SUR L'HYDRATATION DE LA MONTMORILLONITE : PROPRIÉTÉS DIÉLECTRIQUES ET STRUCTURE DU FILM D'EAU (1)

PREMIÈRE ET DEUXIÈME PARTIES (2)

J. MAMY

Station centrale d'Agronomie,
Centre national de Recherches agronomiques, 78 - Versailles
Institut national de la Recherche agronomique

---

(1) Thèse de doctorat ès Sciences physiques soutenue le 12 janvier 1968 à la Faculté des Sciences de l'Université de Paris.

(2) La troisième partie sera publiée dans le nº 3, 1968, des Annales agronomiques.

SOMMAIRE

INTRODUCTION

PREMIÈRE PARTIE

OBSERVATIONS GÉNÉRALES SUR L'HYDRATATION DE LA MONTMORILLONITE MONOIONIQUE SATURÉE PAR DES CATIONS MONOVALENTS.

CHAPITRE I. — CARACTÈRES GÉNÉRAUX DU MINÉRAL

CHAPITRE II. — CONTRÔLE ET ÉTUDE DES ÉCHANTILLONS PAR DES MÉTHODES CLASSIQUES

DEUXIÈME PARTIE

DÉTERMINATION DES PROPRIÉTÉS DIÉLECTRIQUES DE L'EAU ADSORBÉE PAR LA MONTMORILLONITE.

CHAPITRE I. — PRINCIPE ET TECHNIQUE DE LA MÉTHODE

CHAPITRE II. — RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

CHAPITRE III. — HYPOTHÈSES D'INTERPRÉTATION DES PROPRIÉTÉS DIÉLECTRIQUES DE LA MONTMORILLONITE

TROISIÈME PARTIE

DISCUSSION ET INTERPRÉTATON DES RÉSULATS EXPÉRIMENTAUX

CHAPITRE I. — ÉTUDE SYNTHÉTIQUE DES RÉSULTATS DES DEUX PREMIÈRES PARTIES

CHAPITRE II. — INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX A PARTIR D'UN MODÈLE STRUCTURAL DE LA MONOCOUCHE

CONCLUSION GÉNÉRALE

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.

INTRODUCTION

Les propriétés de sorption de la montmorillonite sont connues et utilisées industriellement depuis longtemps. Elles sont particulièrement marquées pour la vapeur d'eau en raison de la structure du minéral et de la surface spécifique qu'il développe. Une étude élémentaire de ce caractère fondamental montre qu'il est étroitement associé à la nature du cation échangeable.

Une littérature abondante existe au sujet des relations eau-argile. Il semble néanmoins, comme le souligne J. MERING (1964), que « le rôle primordial des cations échangeables, qui transforme tout le comportement du minéral a d'abord été sous-estimé lorsque les cristallographes ont commencé à déterminer le schéma structural des minéraux argileux. En effet, le rôle principal semblait dévolu à la structure atomique du feuillet, la capacité d'échange constituant un phénomène parallèle mais non fondamental.

La persistance partielle de cette conception conduit encore aujourd'hui, en sous-estimant le rôle des cations échangeables, à surestimer le rôle des oxygènes de surface dans les relations eau-argile. »

Le nombre d'observations systématiques dont on dispose, n'est peut-être pas encore suffisant pour tenter de définir les raisons profondes des différences de comportement des divers systèmes cation-argile, au sujet de la fixation de l'eau.

L'eau adsorbée est tour à tour définie comme solide, liquide ou tout simplement « anormale ». Il est pourtant aisé de montrer le caractère illusoire d'une telle définition car, si l'on prend en considération :

— la variation du mode d'hydratation en fonction de la nature du cation compensateur,

— les écarts irréductibles entre les isothermes d'adsorption et de désorption d'eau pour un même minéral.

— l'existence d'une eau résiduelle difficile à désorber et dont la réactivité est très élevée,

— la distinction que l'on peut faire entre les différents types de surfaces du minéral,

il faut logiquement proposer la coexistence de plusieurs sortes d'eau.

Il apparaît cependant que ces différentes considérations ne conduisent pas à aborder le problème sous l'angle des mécanismes, parce que les aptitudes réactionnelles du milieu ne sont pas définies. Par ces dernières il faut entendre, par exemple :

— la mobilité et l'état d'ionisation des molécules d'eau,

— l'hydratation et la mobilité des cations échangeables,

— la stabilité relative des différents arrangements possibles des molécules d'eau et des cations.

Un des moyens d'investigation possible de ces facteurs, réside dans l'utilisation de méthodes spectroscopiques modernes, comme la spectroscopie infrarouge, la résonance magnétique nucléaire ou la spectroscopie hertzienne. Ces différentes méthodes n'ont pas encore donné, dans le cas des argiles, tous les résultats qu'elles ont pu fournir dans d'autres domaines, notamment celui de la chimie organique. Ceci tient essentiellement aux difficultés expérimentales liées à la nature solide du produit étudié.

Il nous a paru justifié de tenter un effort dans ce sens, afin de dégager, au moins expérimentalement, les grandes lignes de phénomènes fondamentaux qui interviennent dans les propriétés physico-chimiques des phyllites gonflantes.

Les résultats présentés ont été obtenus d'une part, à l'aide de méthodes classiques (isothermes d'hydratation, diffraction de rayons X) et d'autre part, par la mise en œuvre d'une méthode de mesure des propriétés diélectriques du minéral, moins fréquemment utilisée. La multiplicité des mécanismes accessibles par cette dernière méthode lui confère un attrait tout particulier. Il est raisonnable de penser que même à l'intérieur des limites d'interprétation qui lui sont inhérentes, elle est en mesure d'apporter des précisions nouvelles sur certains faits déjà connus.

PREMIÈRE PARTIE

OBSERVATIONS GÉNÉRALES SUR L'HYDRATATION DE LA MONTMORILLONITE MONOIONIQUE SATURÉE PAR DES CATIONS MONOVALENTS

CHAPITRE PREMIER

CARACTÈRES GÉNÉRAUX DU MINÉRAL ÉTUDIÉ

1. Remarques préliminaires

Ce chapitre rappelle les principales caractéristiques du minéral étudié, en insistant sur les points qui prendront, dans la suite, un intérêt particulier.

Les nombreux travaux dont la montmorillonite a été, et est encore l'objet, permettent de bien connaître sa structure et ses principales propriétés (R. E. GRIM, 1953 ; R. GLAESER, 1953 ; G. BROWN, 1961 ; J. MERING, 1964).

Le minéral choisi pour cette étude est la montmorillonite du Wyoming (fournie par l'*American Colloïd Company*).

2. Obtention — Préparation des échantillons

La montmorillonite brute est purifiée par dispersion dans l'eau. La fraction inférieure à 2 μ est extraite par sédimentation.

Le minéral est préparé à l'état monoionique par agitation au contact d'une solution saline. L'excès de sel est éliminé par centrifugation et dialyse.

La saturation exacte de la capacité d'échange est contrôlée par extraction de la totalité des cations à l'aide d'une solution d'acide chlorhydrique.

3. Caractères morphologiques

Les particules élémentaires de la montmorillonite du Wyoming apparaissent sous forme de plaquettes de 0,5 μ de diamètre moyen et d'environ 100 Å d'épaisseur. Chaque plaquette est donc formée d'une dizaine de feuillets, et ceux-ci sont empilés avec des translations et des rotations aléatoires (A. OBERLIN, J. MERING, 1962).

Les faibles liaisons ioniques interfeuillets ne s'opposent pas à la pénétration des molécules d'eau qui se répartissent en couches plus ou moins ordonnées entre les feuillets élémentaires.

4. Formule stucturale — Capacité d'échange

L'analyse totale du minéral conduit à la formule :

$$M^{+}_{0,34}\,[(Al_{1,56},\ Fe^{3+}_{0,20})\ Mg^{2+}_{0,24}]\ (Al_{0,10},\ Si_{3,90})\ O_{10}(OH)_2$$

Le déficit de charges résultant des substitutions Si, Al dans les couches tétraédriques et Al, Mg dans la couche octaédrique, est compensé par la présence des cations interfeuillets symbolisés par M^{+} dans la formule ci-dessus.

Les cations interfeuillets peuvent être échangés réversiblement par contact avec des solutions salines.

La compensation exacte du déficit de charges par les cations permet de définir la capacité d'échange de l'argile.

Dans le cas de la montmorillonite du Wyoming, la capacité d'échange est de 94 milliéquivalents pour 100 g du minéral séchés à 130°C.

5. Surface spécifique

Les cations et les molécules d'eau se fixent au niveau des espaces interfeuillets et des surfaces basales des cristallites. Les propriétés physico-chimiques du minéral sont donc en relation étroite avec la nature et l'étendue de ces surfaces.

Un cristallite étant formé d'un empilement de feuillets élémentaires, on peut définir trois types de surfaces :

Les surfaces latérales.

Les surfaces basales (ou externes).

Les surfaces interfeuillets (ou internes).

Étant donné le grand diamètre des plaquettes par rapport à leur épaisseur, l'étendue des surfaces latérales est pratiquement négligeable devant la somme des étendues des surfaces externes et internes.

Les surfaces externes et internes sont structuralement identiques, mais les premières étant plus aisément accessibles que les secondes, la distinction entre les deux types de surfaces doit être respectée.

a) *Surface externe*

La surface externe est déterminée à l'aide des isothermes d'adsorption d'azote à — 196°C. Les molécules d'azote ne pénétrant normalement pas dans les espaces interfeuillets, se fixent uniquement sur les surfaces externes.

TABLEAU I

Cation saturant la capacité d'échange	Surface externe en $m^2 . gr^{-1}$
Li	67
Na	45-55
K	44-50
Cs	137
K (150 HD)	92

Les calculs de B. E. T. appliqués à ces isothermes permettent de calculer la surface recouverte par l'azote sous forme d'une couche monomoléculaire.

Le tableau I donne les valeurs de la surface externe pour différents échantillons préalablement séchés à 100°C sous un vide prolongé.

Connaissant les paramètres a et b de la maille élémentaire du réseau, on peut calculer la surface spécifique théorique de la montmorillonite :

masse molaire..... $M = 720$

paramètres dans le plan des feuillets $a = 5{,}3$ Å

$b = 9{,}05$ Å

Surface basale de la maille : $2 \times a \times b = 2 \times 5{,}3 \times 9{,}05 = 96$ Å^2

Pour 1 gramme d'argile, la surface totale serait donc :

$$S = \frac{6{,}02 \times 10^{23} \times 10^{-20} \times 96}{720} = 800 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$$

Les plaquettes ayant en moyenne 10 feuillets d'épaisseur, la surface externe devrait être de 80 m² par gramme environ.

Le tableau 1 donne, sauf pour le cas de la montmorillonite Cs, des chiffres inférieurs à cette valeur théorique. L'écart observé peut être attribué à l'existence, à la surface des particules, d'une hydratation résiduelle extrêmement difficile à désorber. Cette hydratation résiduelle résiste aux conditions de pompage usuelles (ESCARD, J. 1950), et on peut même provoquer la déshydroxylation du réseau sans parvenir à l'éliminer totalement (J. J. FRIPIAT, J. CHAUSSIDON, R. TOUILLAUX, 1960).

Le traitement préparatoire auquel sont soumis les échantillons pour la détermination des surfaces à l'azote, laisse subsister une importante bande d'absorption infrarouge de l'eau adsorbée. Mais il est possible, pour la montmorillonite potassique, de réduire considérablement la teneur en eau résiduelle, en faisant subir au minéral des alternances d'humectations et de dessications. A mesure que le nombre d'alternances croît, on constate la diminution progressive de la bande d'absorption infrarouge de l'eau adsorbée, et la surface à l'azote déterminée après 150 humectations-dessications est de 92 $m^2 \cdot g^{-1}$. Ce dernier fait semble bien confirmer que l'eau résiduelle est responsable de la réduction de la surface accessible à l'azote. L'eau résiduelle, dans les conditions expérimentales usuelles, occupe sensiblement la moitié de la surface externe.

En ce qui concerne la montmorillonite Cs, l'espacement de 11,7 Å du minéral « anhydre » peut permettre la diffusion d'une certaine quantité d'azote dans les espaces interfeuillets, la surface mesurée est dans ce cas surestimée.

b) *Surface totale et surface interne*

La surface totale est déterminée à l'aide du glycol éthylénique qui se fixe dans les espaces interfeuillets de la montmorillonite sous forme d'un complexe à deux couches. Cette technique donne les résultats suivants :

TABLEAU 2

Cation saturant la C. E.	Surface totale ($m^2 \cdot g^{-1}$)
Li	840
Na	830
K	790
Cs	770

La valeur moyenne de la surface totale est de 810 m² par gramme.

La surface interne, si l'on tient compte de la valeur réelle de la surface externe, est par conséquent de 720 m² environ par gramme.

CHAPITRE II

CONTRÔLE ET ÉTUDE DES ÉCHANTILLONS PAR LES MÉTHODES CLASSIQUES

1. Adsorption de la vapeur d'eau — Isothermes d'adsorption

Les isothermes d'adsorption d'eau de la montmorillonite sont établis pour des poudres et pour des pastilles pressées (identiques à celles utilisées dans les mesures diélectriques). Les écarts entre les deux séries d'isothermes sont inférieurs à un poids de 0,5 p. 100 d'eau adsorbée.

300 mg de montmorillonite, séchée préalablement à 150°C, sont mis en équilibre dans un bain thermostaté à 20°C, avec la tension de vapeur d'eau produite par une solution de SO_4H_2 de densité déterminée. Les échantillons sont pesés après dix jours de contact.

La figure 1 représente les isothermes d'adsorption établis pour la montmorillonite du Wyoming saturée par les quatre cations monovalents Li, Na. K et Cs. Ces isothermes appartiennent au type II de BRUNAUER (1945).

Le nombre de couches d'eau adsorbées par la montmorillonite est limité, mais l'équation générale de BRUNAUER, EMMETT et TELLER (1938) est utilisable pratiquement à partir de quatre ou cinq couches d'adsorbat, il est par conséquent légitime d'essayer de l'appliquer aux isothermes de la montmorillonite.

L'équation de B. E. T. a la forme :

$$V = \frac{V_m \; c \, p}{(p_0 - p)\,[1 + (c - 1)\,p/p_0]} \qquad (1)$$

V = volume adsorbé.

V_m = volume équivalent à une couche monomoléculaire d'adsorbat couvrant toute la surface disponible.

p = pression de vapeur de l'adsorbat.

p_0 = pression de vapeur saturante de l'adsorbat.

$c = e^{(E_1 - E_L)/RT}$ avec

E_1 = énergie moyenne d'adsorption dans la première couche.

E_L = énergie de liquéfaction de l'adsorbat.

L'équation (1) peut s'écrire :

$$\frac{p}{V(p_0 - p)} = \frac{1}{V_m c} + \frac{c - 1}{V_m c}\frac{p}{p_0} \qquad (2)$$

Dans tous les cas où les isothermes sont en accord avec la théorie de B. E. T. la fonction $\frac{p}{V(p_0 - p)} = f(p/p_0)$ (3) est une droite, au moins tant que p/p_0 ne dépasse pas la valeur de 0,4.

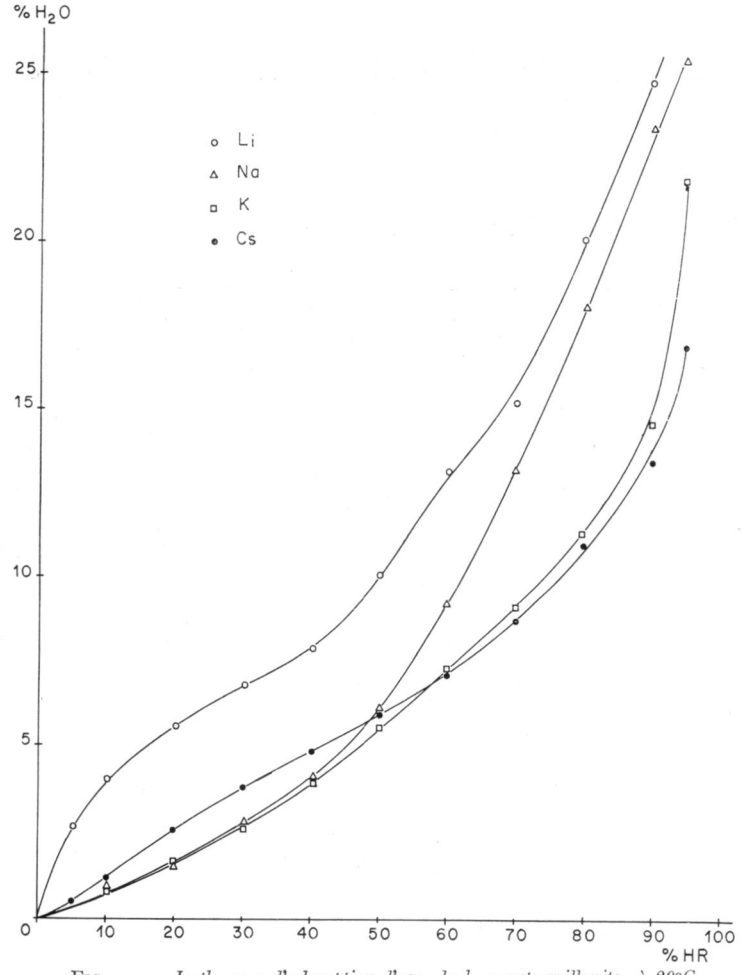


FIG. 1. — *Isothermes d'adsorption d'eau de la montmorillonite, à 20°C*

La figure 2 représente la fonction (3) tracée d'après les isothermes de la figure 1. Pour les pressions relatives de vapeur d'eau inférieures à 0,3, et pour les quatre échantillons, les courbes sont des segments de droites.

A priori, il peut paraître surprenant que la théorie de B. E. T. s'applique à l'adsorption de la vapeur d'eau par la montmorillonite. Cette théorie est en effet relative à l'adsorption par des surfaces libres, alors que la majeure partie de la sur-

face de la montmorillonite est située entre des feuillets superposés. Cette question sera reprise au cours de ce chapitre et une hypothèse explicative proposée.

A l'aide des droites correspondant aux pressions partielles inférieures à 0,3, on peut calculer les termes inconnus de l'équation (2) :

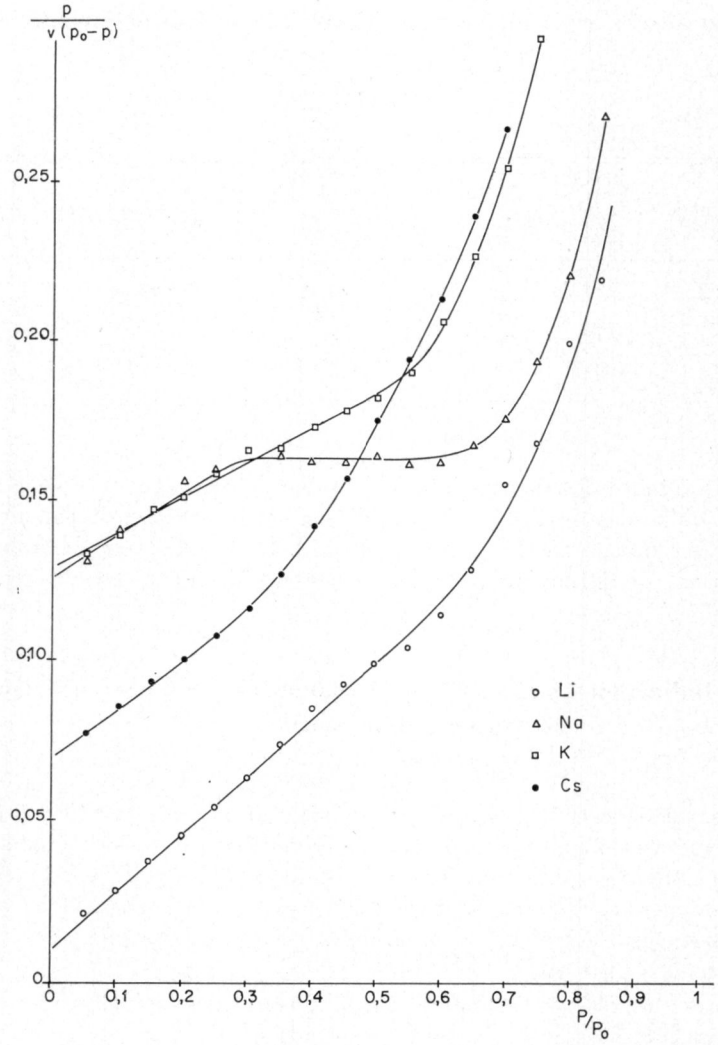


FIG. 2. — *Application de l'équation de B. E. T. aux isothermes d'adsorption d'eau de la montmorillonite*

— V_m (ou ce qui revient au même la surface S couverte par une couche monomoléculaire d'eau).

— c : la connaissance de c permet le calcul de $E_1 - E_L$ et par suite de E_1 si l'on prend $E_L = 10\,550$ cal·mole^{-1} pour la vapeur d'eau à 20°C.

Les résultats sont groupés dans le tableau 3.

c est supérieur à 1, tous les isothermes sont bien du type II de BRUNAUER.

L'énergie d'adsorption dans la première couche reste voisine de l'énergie de liquéfaction de la vapeur d'eau (c'est une des raisons pour lesquelles l'équation de B. E. T. s'applique).

Pour les pressions partielles de vapeur d'eau inférieures à 0,3, la surface mise en jeu dans l'adsorption de la vapeur d'eau, est inférieure à la surface totale de l'argile (800 $m^2 \cdot g^{-1}$ environ), mais supérieure à la surface externe. Tout se passe

TABLEAU 3

Cation saturant la C. E.	S ($m^2 \cdot g^{-1}$)	c	$E_1 - E_L$ ($cal \cdot mole^{-1}$)	E_1 ($cal \cdot mole^{-1}$)
Li	386	18	1 700	12 250
Na	285	2,1	440	10 990
K	306	1,8	330	10 880
Cs	330	3,2	670	11 220

comme si la totalité des espaces interfeuillets ne pouvait être accessible aux molécules d'eau qu'au-dessus d'une valeur minimum de la pression de vapeur d'eau (ce phénomène est signalé aussi par A. JELLI et G. PONCELET (1966). L'interprétation des diagrammes de diffraction de rayons X conduit à la même conclusion.

2. Diffraction de rayons X — Variation des distances interfeuillets en fonction de la teneur en eau

En laissant déposer lentement sur des lames de verre les particules d'une suspension de montmorillonite, on obtient des échantillons formés de cristallites dont les plans 001 s'orientent préférentiellement parallèlement au plan de la lame de verre.

Les distances interfeuillets sont déterminées sur de tels échantillons soumis aux pressions partielles de vapeur d'eau utilisées pour l'établissement des isothermes d'adsorption.

La figure 3 représente l'espacement d_{001} apparent des feuillets en fonction de la teneur en eau, pour les quatre échantillons étudiés.

La nature du cation compensateur a des effets très marqués, mais toutes les courbes sont formées de deux « marches ». La première pour une teneur en eau inférieure à 10 p. 100 environ, la seconde pour les teneurs en eau comprises entre 10 p. 100 et 20 p. 100.

Les deux paliers correspondent à des espacements de 11,7 Å et de 15,5 Å environ.

L'espacement de 11,7 Å est inférieur à celui de 12,4 Å, généralement obtenu pour une couche d'eau (R. W., MOONEY, A. G. KEENAN, L. A. WOOD 1952), il peut être expliqué par l'existence d'un complexe d'interstratification.

L'équidistance de 15,5 Å peut, par contre, être attribuée à la présence de deux couches d'eau interfeuillets.

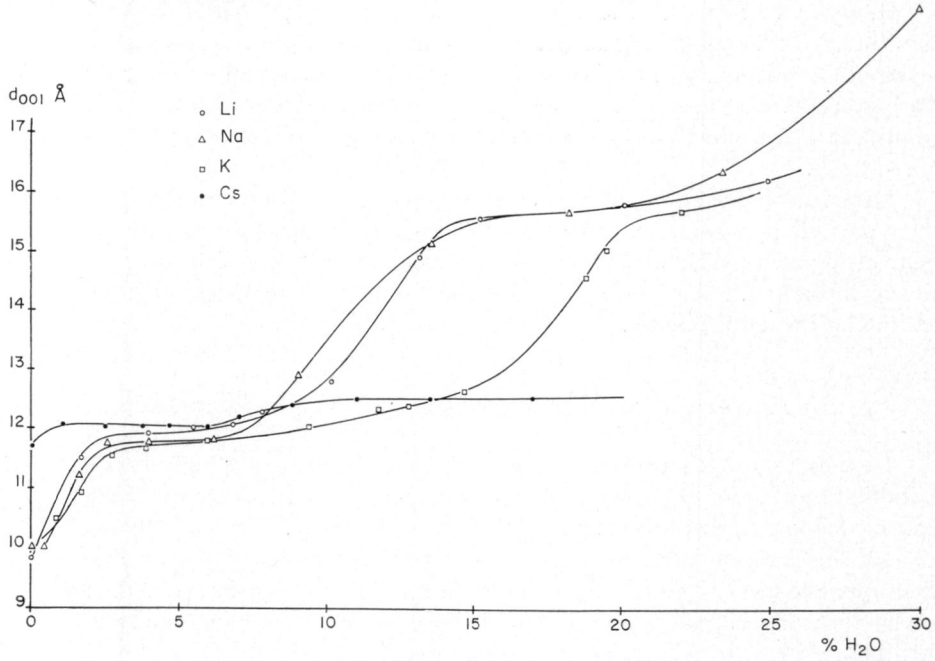


FIG. 3. — *Courbes représentatives des espacements apparents* d_{001} *de la montmorillonite, en fonction de la teneur en eau*

a) *Analyse des complexes d'interstratification. Diagrammes de* BROWN *et* MAC EWAN

L'analyse d'un complexe d'interstrafication peut être envisagée directement à partir de la position et de l'intensité des pics de diffraction de rayons X (D. M. C. MAC EWAN, 1956), mais le calcul n'est significatif que pour un nombre de pics assez élevé. Les échantillons interstratifiés de montmorillonite hydratée donnent au plus quatre réflexions basales mesurables, il faut par conséquent recourir à une méthode indirecte.

S. B. HENDRICKS et E. TELLER (1942) ont proposé des formules qui permettent de calculer l'effet d'un mélange de deux équidistances différentes sur les intensités des phénomènes de diffraction.

Trois conditions sont néanmoins nécessaires à la validité de ces formules :

1° Les feuillets sont interstratifiés au hasard.

Cette condition paraît réalisée dans le cas de l'hydratation de la montmorillonite (J. MERING, 1961).

2° Les feuillets possèdent tous le même facteur de structure.

La contribution de l'eau interfeuillets au facteur de structure de la montmorillonite est très faible, les feuillets ont donc, pratiquement tous, le même facteur de structure.

3° Les cristallites ont une étendue infinie.

Cette dernière condition est pratiquement irréalisable, mais elle n'influe que sur l'étalement des pics de diffraction et non sur leur position (J. MERING, 1949).

G. BROWN et D. M. C. MAC EWAN (1949) ont établi, à partir des formules de HENDRICKS et TELLER, des diagrammes donnant le pourcentage de chacune des phases d'un mélange en fonction de l'espacement apparent mesuré par diffraction des rayons X. Certains de ces diagrammes sont applicables à des micas dioctaédriques et à des montmorillonites, pour des mélanges 10 Å-12,4 Å ; 12,4 Å-15,4 Å ; 10 Å-15,4 Å.

La précision de la détermination des pourcentages des deux constituants dépend d'une part, de la façon dont sont respectées les trois conditions énoncées précédemment et, d'autre part, de la précision de la mesure de la position des maxima des pics de diffraction. Il n'en reste pas moins que l'ordre de grandeur de ces pourcentages est une indication précieuse.

b) *Processus d'ouverture des feuillets au cours de l'hydratation*

La variation de l'espacement interfeuillets des différents échantillons de montmorillonite au cours de l'adsorption de la vapeur d'eau, montre qu'il existe pour chacun d'eux un processus d'hydratation caractéristique.

La comparaison des courbes expérimentales de la figure 3, avec une courbe théorique que nous avons établie à partir d'un processus d'hydratation que l'on peut considérer comme idéal, permet d'obtenir des précisions sur les mécanismes de l'adsorption.

Le processus d'hydratation « idéal » choisi correspond à un recouvrement par feuillets entiers aboutissant, successivement, à la formation d'une seule couche homogène, puis de deux couches homogènes, dans tous les espaces interfeuillets. On suppose que les surfaces externes sont recouvertes en priorité (le même calcul effectué en supposant les deux types de surfaces recouvertes simultanément ne modifie pratiquement pas les résultats).

Le calcul de l'espacement apparent théorique correspondant à chaque teneur en eau est assez simple : connaissant l'étendue des surfaces mises en jeu, et l'encombrement moléculaire de l'eau, on calcule la surface couverte sous forme d'une couche unique (en commençant par les surfaces externes). Le taux de surface interne couverte donne alors le pourcentage d'espacements à 12,4 Å. On procède de la même manière pour le recouvrement à deux couches et le taux d'espacements à 15,4 Å. L'espacement d_{001} apparent est déterminé à partir des graphiques de BROWN et MAC EWAN.

La figure 5 représente la courbe théorique de variation de l'espacement d_{001} apparent en fonction de la teneur en eau (la courbe discontinue correspond au calcul effectué pour le recouvrement simultané des surfaces externes et internes).

La confrontation des figures 3 et 5 appelle les conclusions suivantes :

— aucune des quatre courbes expérimentales ne répond exactement au processus théorique de la figure 4 ;

— les courbes des montmorillonites Li et Na sont très différentes de la courbe théorique, quelle que soit la teneur en eau ;

— la courbe de la montmorillonite K est analogue aux courbes des montmo-

rillonites Li et Na jusqu'à 8 p. 100 d'eau environ, mais elle est pratiquement confondue avec la courbe théorique au-dessus de 8 p. 100 d'eau ;

— la courbe relative à la montmorillonite Cs ne peut pas être comparée à la courbe théorique, car les espacements interfeuillets restent compris entre 11,7 Å et 12,5 Å.

L'intérêt du schéma théorique proposé apparaît mieux dans la signification que l'on peut donner aux différences observées entre la courbe théorique et les courbes expérimentales :

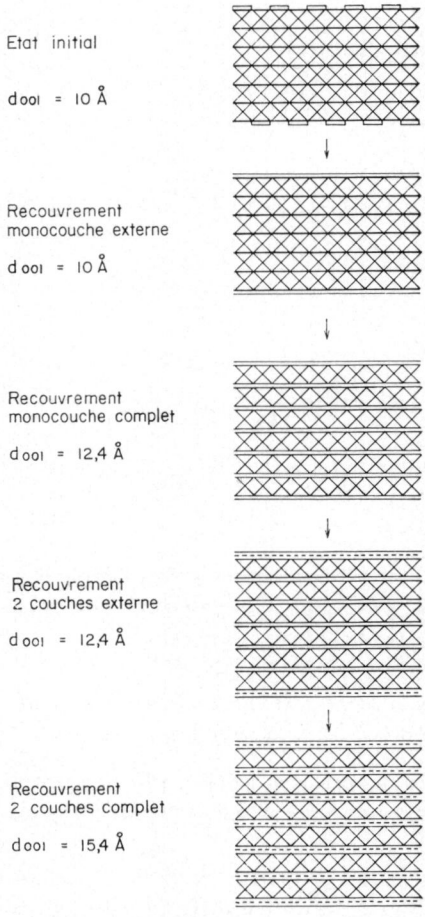


FIG. 4. — *Un processus d'hydratation « idéal » de la montmorillonite.*

1. *Les valeurs expérimentales de l'espacement apparent sont toujours supérieures aux valeurs théoriques.*

Le nombre de feuillets ouverts est donc plus grand que le calcul ne le prévoit.

Deux interprétations possibles :

— la surface réelle occupée par une molécule d'eau n'est pas celle utilisée dans le calcul ;

— les feuillets ouverts ne sont pas totalement recouverts par les molécules d'eau qui constituent seulement des « cales» réparties dans les espaces interfeuillets.

La première interprétation suppose que la surface moléculaire de l'eau varie avec la teneur en eau de l'échantillon et avec la nature du cation interfeuillets (ce qui est en contradiction avec les résultats des mesures diélectriques exposées plus loin).

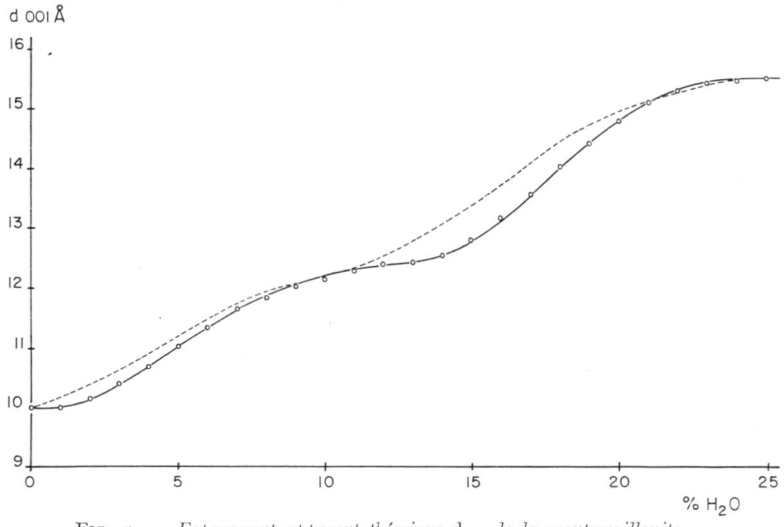


FIG. 5. — *Espacement apparent théorique* d_{001} *de la montmorillonite, en fonction de la teneur en eau*

La deuxième hypothèse est évidemment plus simple et présente en outre l'avantage de rendre compte de l'existence des paliers et des brusques variations du paramètre d_{001}, visibles sur les courbes de la figure 3.

2. *Les courbes expérimentales présentent des paliers pour des valeurs de l'espacement apparent correspondant à des interstratifications.*

A des teneurs en eau comprises entre 3 p. 100 et 8 p. 100, les courbes présentent toutes un palier autour d'une valeur moyenne de l'espacement apparent égale à 11,8 Å.

L'existence d'un palier ne peut être expliquée, dans le cas présent, que par le remplissage progressif d'un nombre constant de feuillets préalablement ouverts.

L'espacement apparent de 11,8 Å signifie que 70 p. 100 seulement des feuillets sont accessibles à l'eau dans la première phase de l'hydratation (c'est une confirmation de la remarque faite, à la fin du précédent paragraphe, au sujet des isothermes d'adsorption d'eau).

On peut finalement admettre que les premières molécules d'eau adsorbées ouvrent un grand nombre de feuillets (mais non la totalité) et forment des « cales » qui maintiennent ces feuillets ouverts. Les surfaces devenues accessibles se remplissen-ensuite progressivement.

3. *La formation de la deuxième couche accuse les différences de comportement entre les quatre échantillons.*

— Pour les montmorillonites Li et Na, le passage à 15,5 Å se produit très rapidement. Aucun point singulier n'apparaît sur les courbes pour la valeur de 12,4 Å correspondant théoriquement à l'existence d'une couche homogène ; l'ouverture à 15,5 Å commence donc avant que la totalité des feuillets soit recouverte par une seule couche. Les premières molécules d'eau adsorbées en supplément de la première couche forment à leur tour des cales qui portent l'espacement à 15,5 Å, sans que le recouvrement soit total. Le deuxième palier (entre 14 % et 20 % d'eau adsorbée) correspond au remplissage des espaces disponibles.

— La montmorillonite potassique s'hydrate beaucoup plus régulièrement que les deux précédentes et passe à deux couches par feuillets complets.

— La montmorillonite Cs ne dépasse pas l'espacement de 12,5 Å, quelle que soit la teneur en eau. Il y a donc à partir d'une certaine tension de vapeur, accumulation d'eau sur les surfaces externes des particules cristallines.

Le mécanisme de formation de la deuxième couche d'eau interfeuillets montre que la stabilité de la première couche varie avec la nature du cation compensateur et fait apparaître une zone d'hydratation dans laquelle coexistent des espacements à 10 Å, 12,5 Å, et 15,5 Å. Cette zone ne peut être étudiée que sur la base d'une interstratification triple, il sera nécessaire d'en tenir compte dans l'interprétation de certaines propriétés du système argile-eau.

3. Résumé synthétique des observations

L'interprétation des isothermes d'adsorption d'eau et des diagrammes de diffraction de rayons X pose le problème du mécanisme de l'hydratation de la montmorillonite, dans ses relations étroites avec le cation compensateur.

Le tableau 4 rassemble un certain nombre de résultats qui pourront servir de base à la discussion entreprise dans ce paragraphe.

TABLEAU 4

Cation saturant la C. E.	Rayon du cation Å	d_{001} des échantillons séchés à 130°C, en Å	Nombre limite de couches d'hydratation	$E_1 - E_L$ cal·mole^{-1}	E_1 cal·mole^{-1}	Énergie d'hydratation du cation en solution kcal·ion^{-1}
Li	0,60	10	> 4	1 700	12 250	136
Na	0,95	10	> 4	440	10 990	114
K	1,33	10	= 4	330	10 880	94
Cs	1,69	11,7	= 1	670	11 220	80

a) *Nature des isothermes d'adsorption d'eau*

La comparaison des figures 1, 2 et 3 permet de constater que l'équation de B. E. T. s'applique au cas de l'adsorption de l'eau par la montmorillonite dans des limites de pressions de vapeur d'eau correspondant, non seulement au recouvrement

de la surface externe, mais également à la formation d'une couche dans les espaces interfeuillets. Tout se passe donc comme si l'eau interfeuillets était adsorbée physiquement sur une surface libre. Cette conclusion apparemment surprenante peut, toutefois, trouver une explication :

La surface active d'adsorption n'est pas simplement formée par les oxygènes des couches silicatées, c'est en réalité l'ensemble cation-feuillet qui détermine les processus d'adsorption.

Les premières molécules d'eau mises en présence du minéral sont énergiquement adsorbées et provoquent son ouverture en jouant un rôle de « cales » ; il en résulte une diminution brusque de la cohésion interfeuillets. Par suite, le remplissage complet des espaces interfeuillets met en jeu des énergies plus faibles que celles nécessaires à la fixation des premières molécules d'eau, et l'adsorption de « remplissage » se produit autour des molécules d'eau constituant les cales interfeuillets.

Cette interprétation a l'avantage de rendre compte des similitudes de cette adsorption avec une adsorption physique multimoléculaire :

— la valeur E_1 de l'énergie d'adsorption est voisine de l'énergie de liquéfaction de la vapeur d'eau ;

— la surface d'adsorption est accessible grâce aux cales constituées par les premières molécules fixées et peut donc être considérée comme libre ;

— l'adsorption peut être considérée comme multimoléculaire dans la direction parallèle au plan des feuillets.

Les limites d'application de l'équation de B. E. T. à la formation de la première couche d'eau sont dues aux différences fondamentales existant entre les mécanismes de formation de cette première couche et ceux des couches suivantes. Les énergies d'interaction cation-eau et les énergies de cohésion interfoliaires sont en effet considérablement modifiées par la présence de la première couche.

b) *Mécanismes de l'hydratation*

La variété des comportements de la montmorillonite vis-à-vis de l'eau peut être attribuée d'une part, aux différences d'affinité cation-eau et d'autre part, à l'intervention directe du cation dans les forces de cohésion interfeuillets.

Lorsqu'une molécule d'eau pénètre entre deux feuillets, elle doit vaincre les forces de cohésion existant entre ces feuillets. La plus ou moins grande facilité de l'hydratation résulte donc de la concurrence entre deux processus mettant en jeu :

1° une énergie d'attraction E_A des molécules d'eau, qui comprend à la fois l'énergie d'interaction cation-eau, et l'énergie due à des interactions entre les molécules d'eau et les feuillets (par exemple, dans les relations des molécules d'eau avec les hydroxyles du réseau) ;

2° une énergie de cohésion interfeuillets E_c, qui résulte à la fois du rôle du cation et de l'existence de forces de liaisons entre feuillets adjacents.

Le bilan énergétique conduit à une espression schématique de l'énergie d'adsorption E des molécules d'eau :

$$E = E_A - E_c \qquad (4)$$

Pour la première couche adsorbée, l'énergie E_1 du tableau 4 est ainsi l'énergie d'adsorption de « remplissage ».

Le rôle du cation se manifeste à la fois dans les termes E_A et E_c de l'expression (4):

— l'énergie d'interaction cation-eau est d'autant plus élevée que le diamètre du cation est faible (tabl. 4 dernière colonne). Cette énergie est pourtant différente de celle que l'on peut évaluer dans une solution, car si le cation « s'enfonce » dans la structure, son action sur les molécules d'eau superficielles peut devenir très faible.

— La faiblesse des liaisons interfeuillets des phyllites gonflantes est attribuée au mode de répartition des cations interfoliaires. Les cations monovalents sont logés au niveau des cavités hexagonales proches des charges de substitution, ils appartiennent donc préférentiellement à un feuillet (situation dissymétrique). Il en résulte un affaiblissement de la liaison du cation à l'autre feuillet. La dissymétrie doit être d'autant plus accusée que le diamètre du cation est faible, et par conséquent la cohésion interfeuillets doit être d'autant plus faible que le cation est petit.

En résumé, la pénétration de l'eau dans les espaces interfeuillets des échantillons de montmorillonite étudiés, est régie par quatre conditions principales :

1° la cohésion interfeuillets est plus faible avec le lithium (en raison de sa petite taille) et le césium (en raison de l'espacement interfeuillets initial de 11,7 Å), qu'avec le sodium et le potassium ;

2° l'affinité eau-cation est plus faible pour le lithium (qui est le plus enfoncé dans le réseau) et le césium (qui est le plus volumineux) que pour le sodium et le potassium ;

3° l'accroissement de la distance interfeuillets diminue l'énergie de cohésion E_c ;

4° l'hydratation des cations par les premières molécules d'eau adsorbées diminue l'interaction cation-eau pour les molécules adsorbées ultérieurement, et affaiblit, par un effet d'écran, le rôle du cation dans la cohésion interfeuillets.

En tenant compte de ces quatre conditions, nous pouvons proposer, au moins qualitativement, une interprétation des mécanismes de l'hydratation.

α) Les premières molécules d'eau adsorbées provoquent une brusque diminution de E_c, sans que E_A varie sensiblement, ce qui entraîne l'ouverture rapide des feuillets sans remplissage complet. L'ouverture est d'autant plus rapide, et l'adsorption initiale d'autant plus forte, que la cohésion interfeuillets est faible et l'affinité cation-eau élevée.

Les isothermes d'adsorption (fig. 1) et les courbes d'ouverture des feuillets (fig. 3) sont en parfait accord avec cette conséquence des quatre conditions énoncées plus haut, puisque l'adsorption initiale d'eau par la montmorillonite est beaucoup plus forte pour le Li et le Cs, que pour le Na et le K.

β) Le passage de l'espacement interfeuillets de 10 Å à 12,4 Å puis à 15,5 Å, et l'hydratation des cations, diminuent la valeur de E_c. L'effet d'écran des molécules d'eau est d'autant plus important que la taille du cation est faible devant celle des molécules d'eau qui l'entourent, et que le cation est plus « enfoncé » dans le réseau.

L'affaiblissement de la cohésion interfeuillets au cours de l'adsorption est par conséquent plus marqué pour le Li et le Na que pour le K et le Cs (ces derniers ayant une taille égale ou supérieure à celle des molécules d'eau) :

— Si la cohésion interfeuillets devient très faible, E_A garde une valeur supérieure à E_c. Le nombre de couches d'eau adsorbées peut devenir relativement élevé, et l'adsoprtion prend finalement l'allure d'une condensation capillaire. C'est ce qui est observé pour les montmorillonites Li et Na.

— Si la cohésion interfeuillets garde, au cours de l'hydratation, une valeur assez élevée, il peut arriver que E_c devienne égale ou supérieure à E_A. A partir du moment où $E_c \geqslant E_A$, l'adsorption s'arrête. C'est ce qui est observé pour la montmorillonite K à partir de 4 couches d'eau interfeuillets et pour la montmorillonite Cs dès la première couche.

γ) Les mêmes mécanismes peuvent rendre compte du rapide passage des montmorillonites Li et Na de l'état 1 couche à l'état 2 couches, et de la relative stabilité de la montmorillonite K à 1 couche. On a d'ailleurs pu remarquer que le potassium confère à la montmorillonite une plus grande résistance à l'hydratation que les trois autres cations monovalents utilisés. Ce caractère privilégié peut être attribué au volume du cation : le potassium est beaucoup moins engagé dans le réseau que le lithium et le sodium, mais ne gêne pas, comme le césium, la « fermeture » des feuillets ; il peut par conséquent assurer une meilleure cohésion interfeuillets que les autres cations monovalents.

c) *Conclusion*

Les isothermes d'adsorption d'eau et les diagrammes de diffraction de rayons X mettent en relief les caractères particuliers de chacune des associations argile-cation étudiées. Les processus énergétiques mis en jeu soulignent le rôle déterminant du cation dans le comportement du minéral.

Les résultats expérimentaux exposés jusqu'ici concernent des « manifestations extérieures » de l'interaction eau-argile (nature des interstratifiés, rôle du cation, etc.). Les conséquences de cette interaction au niveau même des espaces interfeuillets doivent être recherchées par des méthodes mettant en jeu des « mécanismes » physico-chimiques. C'est l'objet de la deuxième partie du présent travail.

DEUXIÈME PARTIE

DÉTERMINATION DES PROPRIÉTÉS DIÉLECTRIQUES DE L'EAU ADSORBÉE PAR LA MONTMORILLONITE

CHAPITRE PREMIER

PRINCIPE ET TECHNIQUE DE LA MÉTHODE

1. Choix de la méthode

Les propriétés diélectriques d'un corps dépendent, le plus souvent très étroitement, de divers facteurs physico-chimiques tels que la température, la pression, les impuretés, les défauts de réseau, etc. La mesure des propriétés diélectriques est donc une technique de choix pour l'étude des propriétés structurales mettant en jeu des mouvements ioniques ou moléculaires associés à des défauts de réseau.

On peut ainsi s'attendre, en particulier dans le cas d'une phase adsorbée sur la montmorillonite, à ce que cette méthode apporte, bien que d'une façon indirecte, des renseignements sur la configuration du film moléculaire présent à la surface du solide (structure, défauts de réseau, existence de porteurs de charge libres ou liés).

Les propriétés diélectriques de l'eau liquide ou solide, et de l'eau adsorbée sur divers supports minéraux et organiques, ont de ce fait été déjà abondamment étudiées (voir à ce sujet : M. et R. FREYMANN, 1954 ; R. FREYMANN, M. SOUTIF, 1960 ; J. B. HASTED, 1961 ; M. KOPP, 1964 ; J. MAMY, 1965).

Les principales conclusions à retenir des différents travaux sont les suivantes :

1° l'eau liquide présente un phénomène d'absorption dipolaire à température ordinaire dans le domaine des ondes centimétriques (E. H. GRANT et *al.*, 1957) ;

2° la glace pure normale présente une absorption dipolaire dans le domaine des ondes kilométriques. Les impuretés jouent un rôle considérable dans l'altération des effets d'absorption dipolaire et dans l'apparition d'une conductivité (M. BJERRUM, 1952 ; R. P. AUTY et R. H. COLE, 1952 ; H. GRANICHER et *al.*, 1957) ;

3° le changement de phase glace-eau produit une discontinuité des effets d'absorption dipolaire et de conductivité (M. et R. FREYMANN, 1951) ;

4° l'eau fixée sur les minéraux a été étudiée initialement dans le but de distinguer eau libre, eau de cristallisation et eau adsorbée (M. et R. FREYMANN, 1951 et R. FREYMANN, 1952). Par la suite, les mesures diélectriques ont eu pour objet l'étude du comportement physique de l'eau adsorbée (changements de phases, interactions eau-surface) ; les travaux publiés portent sur les cristaux ioniques (J. LAJZEROWICZ, B. HUMBERT, 1963 ; J. LAJZEROWICZ, 1963), les gels de silice (J. LEBOT, S. LE MONTAGNER, 1951, 1955 ; M.-T. ROLLAND, R. BERNARD, 1951 ; A. LEBRUN et *al.*, 1963) et les argiles.

En ce qui concerne les argiles, les recherches ont eu pour but :

a) l'influence de la nature des surfaces sur les propriétés diélectriques (J. MUIR, 1954 ; A. BARON, 1966 ; A. CHAPOTON, J. M. WACRENIER, 1967) ;

b) le rôle du cation échangeable dans l'absorption dipolaire (B. J. GOLDSMITH, J. MUIR, 1960) ;

c) le rôle des surfaces et du cation échangeable dans les mécanismes de conductivité (A. CREMERS, 1964 ; G. PONCELET, 1964 ; R. WEILER, 1966).

Les charges localisées que constituent les cations fixés à la surface des feuillets d'argile communiquent à l'eau adsorbée des propriétés diélectriques caractéristiques. Cependant, ni la structure des couches d'eau adsorbée, ni le rôle exact du cation, ni les mécanismes de l'absorption dipolaire et de la conductivité des argiles n'ont encore été précisés de manière satisfaisante. Les conditions expérimentales choisies (teneurs en eau, températures, fréquences) ne permettaient pas d'obtenir les renseignements nécessaires. Nous nous sommes donc efforcé d'explorer de nouveaux domaines, en essayant de définir avec le plus de précision possible, les éléments constitutifs du milieu en relation avec les conditions de chaque expérience.

2. Rappels théoriques

a) *Rôles de la température et de la fréquence*

Les mécanismes de relaxation dipolaire et de conductivité sont fortement dépendants de la température :

— Les variations de température provoquent des modifications des hauteurs des barrières d'énergie, et peuvent par conséquent favoriser ou supprimer les manifestations de certains phénomènes. Il en est ainsi des processus de conductivité, pour lesquels un mécanisme donné peut n'apparaître que dans un domaine limité de températures.

— Les fréquences de relaxation dipolaires ν_c, et les conductivités σ, sont liées à la température par des expressions de la forme :

$$\nu_c = A \exp. - U/kT \text{ (P. DEBYE, 1929 ; H. EYRING, 1936)}$$
$$\sigma = \sigma_0 \exp. - Q/kT \text{ (M. F. MOTT, R. W. GURNEY, 1940)}$$

où U et Q sont les énergies d'activation des phénomènes mis en jeu.

L'abaissement de la température provoque par conséquent une diminution des fréquences de relaxation et des conductivités.

Le domaine de températures couvert au cours des expériences doit donc être aussi étendu que possible (comprenant évidemment, dans l'étude de l'eau adsorbée, la zone de transition solide-liquide de l'eau), et la bande de fréquences explorée, aussi large que possible.

En ce qui concerne les propriétés diélectriques de l'eau, les domaines de fréquences intéressants sont situés dans la gamme des ondes centimétriques et dans la gamme des ondes kilométriques. L'absorption dipolaire peut se manifester dans ces deux domaines, mais les processus de pertes par conductivité ionique ne sont, par contre, réellement apparents que dans le domaine kilométrique.

Pour atteindre à la fois des phénomènes d'absorption dipolaire et des phénomènes de conductivité, il faut donc choisir le domaine des basses fréquences.

La conduite des expériences, et la réalisation des mesures, dépendent d'une part, de l'intervalle de variation des températures, et d'autre part, très étroitement, des fréquences du champ électrique alternatif utilisé : les mesures sont faites entre 130°K et 330°K pour des fréquences inférieures à 20 kilocycles par seconde.

b) *Permittivité complexe*

L'argile, conditionnée en hydratation et en température, forme le diélectrique d'un condensateur. Ce diélectrique présente des pertes, dont les origines peuvent être différentes (absorption dipolaire et conductivité, par exemple). La mesure consiste à déterminer la composante conductive G, et la composante capacitive C du circuit parallèle équivalent au condensateur.

Les propriétés du diélectrique sont résumées dans l'expression de sa permittivité complexe.

Lorsqu'un condensateur avec pertes est relié à une tension sinusoïdale V de pulsation ω un courant de perte i_p s'ajoute au courant de charge i_c, au total :

$$i = i_p + i_c \tag{5}$$

Pour le circuit parallèle G, C équivalent :

$$i_p = VG, \; i_c = Vj C\omega$$

donc $$i = V(G + jC\omega) \tag{6}$$

Si Z est l'impédance du condensateur :

$$Z = \frac{1}{G + jC\omega} \tag{7}$$

soit, d'autre part, ε^* la permittivité globale du diélectrique, et C_0 la capacité du condensateur vide, on peut alors écrire :

$$Z = \frac{1}{jC_0\varepsilon^*\omega} \tag{8}$$

des équations (7) et (8) il vient :

$$jC_0\varepsilon^*\omega = G + jC\omega$$

en divisant les deux membres par $jC_0\omega$, on obtient

$$\varepsilon^* = \frac{C}{C_0} - j\frac{G}{C_0\omega} \tag{9}$$

que l'on peut écrire

$$\boxed{\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon''} \tag{10}$$

avec

$$\boxed{\varepsilon' = \frac{C}{C_0}} \qquad \boxed{\varepsilon'' = \frac{G}{C_0\omega}}$$

ε' apparaît comme étant la constante diélectrique réelle du condensateur.
ε'', proportionnel à la conductivité G est appelé facteur de perte.

$\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} = \frac{G}{C\omega} = \frac{ip}{ic}$ est le rapport du courant de perte au courant de charge, il est appelé facteur de dissipation, ou tangente de l'angle de perte δ. Le courant total qui traverse le condensateur est en avance de $\left(\frac{\pi}{2} - \delta\right)$ sur la tension.

Le déplacement électrique D et le champ électrique E sont liés par la relation :

$$D = \varepsilon^* \cdot E \tag{11}$$

Le déplacement électrique D dans le diélectrique est déphasé d'un angle δ par rapport au champ électrique E, c'est-à-dire que si :

$$E = E_0 \cdot e^{j\omega t} \tag{12}$$

$$D = D_0 \cdot e^{(j\omega t - \delta)} \tag{13}$$

d'où

$$E_0 \cdot e^{j\omega t} = \varepsilon^* \cdot D_0 \cdot e^{(j\omega t - \delta)} \tag{14}$$

et enfin :

$$\varepsilon'' = \frac{D_0}{E_0} \sin \delta \qquad \text{et} \qquad \varepsilon' = \frac{D_0}{E_0} \cos \delta \tag{15}$$

à partir de ces deux dernières expressions, on peut démontrer que l'énergie totale dissipée par unité de volume du condensateur est (C. J. F., BOTTCHER 1952) :

$$\boxed{W = \frac{\omega E_0^2}{8\pi} \varepsilon''} \tag{16}$$

La plupart des résultats expérimentaux seront présentés à l'aide des valeurs de ε' et de ε''. L'ensemble des équations (1) à (16) éclaire la signification de ces deux paramètres, mais l'équation (16) montre que le terme ε'' est particulièrement intéressant, parce qu'il représente une perte globale d'énergie dans le diélectrique. Cette perte globale d'énergie est généralement due à la coexistence de plusieurs phénomènes qu'il est évidemment important de pouvoir différencier.

c) *Signification des mesures*

L'argile constitue un diélectrique hétérogène formé de grains juxtaposés. Chaque grain est lui-même un empilement de feuillets entre lesquels s'interposent un nombre variable de couches d'hydratation.

Étant donné la complexité du milieu, il ne semble pas possible, *a priori*, d'atteindre isolément les manifestations des différents phénomènes qui peuvent être provoqués par l'établissement d'un champ électrique variable entre les plaques du condensateur.

Parmi ces phénomènes, il faut citer principalement [1] :

— l'Absorption Dipolaire Debye (ADD) liée à des dépenses d'énergie provoquées par les mouvements des dipôles associés à des défauts de réseau ;

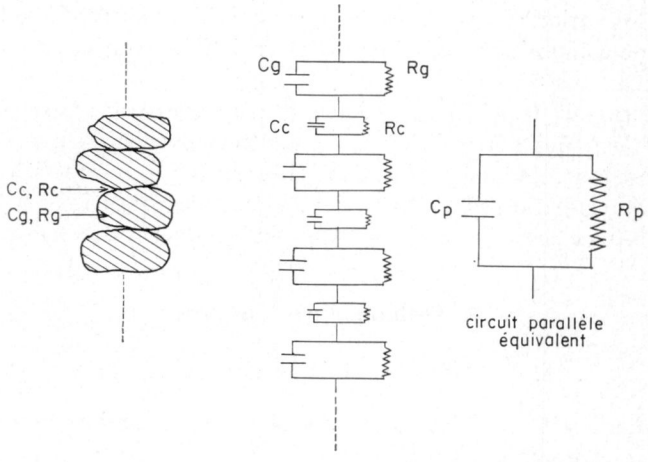
— la conductivité par porteurs libres ;

[1] L'étude de ces différents phénomènes sera reprise plus en détail dans la suite de ce travail.

— l'effet Maxwell-Wagner, associé à la conductivité et qui est une fonction de l'hétérogénéité du milieu. Ses manifestations sont identiques à celles de l'ADD et il prend par conséquent l'allure d'un effet parasite.

L'amplitude de ces différents effets est fonction de la composition du milieu et des facteurs de conditionnement de l'échantillon.

On détermine les composantes ε' et ε'' de la permittivité complexe du minéral, mais les valeurs obtenues définissent une propriété globale. Il est donc important de connaître les éléments du milieu qui jouent le rôle dominant vis-à-vis des propriétés diélectriques. On peut, pour cela, essayer de décrire un schéma électrique équivalent au système constitué par l'association des particules d'argile. De tels schémas existent déjà pour des diélectriques de nature comparable, et l'un d'entre eux fournit des renseignements intéressants. Il représente l'équivalent d'un empilement de grains identiques séparés par une zone de contact.



R_c et C_c, Résistance et capacité de contact entre deux grains.

R_g et C_g, Résistance et capacité du grain.

R_p et C_p, Résistance et capacité du circuit parallèle équivalent.

Il faut envirsager deux possibilités :

1° Dans le cas d'une poudre sèche comprimée, on peut généralement considérer que :

$$R_c > R_g \quad \text{et} \quad C_c >> C_g$$

L'expression de l'équivalent parallèle R_p, R_c du circuit (C. M. HUGGINS et A. H. SHARBAUGH, 1963) montre alors que pour les fréquences supérieures à 100 Hz :

$$R_p \sim R_g$$
$$C_p \sim C_g$$

Les caractéristiques mesurées sont celles du grain.

2° Si l'on peut admettre que pour un échantillon parfaitement déshydraté, le grain est la particule minérale sèche, il n'en est plus de même si ce grain adsorbe une certaine quantité d'eau. C'est en particulier le cas des argiles, où la quantité d'eau

fixée peut être très importante. Le grain est alors réduit au feuillet, et la zone de contact entre deux grains est constituée par l'eau adsorbée. Il en résulte que :

$$R_g > R_c$$
$$C_g > C_c$$

Et l'expression de l'équivalent parallèle conduit à :

$$R_p \sim R_c$$
$$C_p \sim C_c$$

Les caractéristiques mesurées sont alors celles de l'eau adsorbée.

L'exploitation des mesures sur la base des caractéristiques diélectriques propres de chacun des constituants présente des difficultés pratiquement insurmontables. En particulier, les variations de conductivité en fonction des différents facteurs définissant le milieu ne peuvent s'interpréter simplement, parce qu'elles font intervenir à la fois les variations effectives des conductivités des constituants, mais aussi les variations de composition du milieu, et les variations relatives des conductivités des constituants.

Quoi qu'il en soit, le schéma précédent montre que ce sont essentiellement les propriétés de l'eau qui déterminent le comportement diélectrique de l'ensemble argile-eau. Il est par conséquent possible d'utiliser ces propriétés diélectriques pour étudier les relations cation-eau. C'est-à-dire, l'influence du cation sur les propriétés de l'eau adsorbée, et la variation de ces propriétés au cours de l'hydratation.

3. Technique des mesures

A. — Préparation des échantillons

La montmorillonite, préalablement saturée par les cations monovalents, est finement broyée et tamisée à 50 μ.

300 mg de poudre séchée à l'étuve sont introduits dans un moule cylindrique et pressés à 30 kg/cm^2. On obtient une pastille compacte de 1 cm de diamètre et de 2 mm d'épaisseur environ.

Deux pastilles identiques, provenant du même lot d'argile, sont mises en contact, à 20°C, avec la pression de vapeur d'eau d'une solution d'acide sulfurique de densité connue. Le même couple de pastilles sert tout au long d'une série d'expériences à différentes hydratations. L'une des deux pastilles est utilisée pour les mesures diélectriques, et l'autre sert à déterminer les quantités d'eau exactement adsorbées, pour la pression partielle de vapeur d'eau de l'expérience.

Les caractéristiques géométriques de la pastille (diamètre et épaisseur), sont déterminées à chaque expérience.

B. — Dispositif expérimental

Le dispositif de mesure comprend :

— une cellule contenant le condensateur qui peut être refroidi ou chauffé par un dispositif approprié ;

— un ensemble de mesure des caractéristiques du condensateur.

α) *Cellule de mesure.*

La cellule de mesure utilisée est représentée par la figure 6.

La pastille d'argile est pressée entre deux électrodes de laiton poli. Le condensateur ainsi constitué est maintenu dans un tube de téflon. Le tube est placé dans un bloc de laiton dont la masse communique à l'ensemble une inertie thermique satisfaisante.

Deux fils blindés partant des électrodes assurent le raccordement au pont de mesure. Un thermocouple pénètre dans le tube de téflon, au voisinage immédiat de la pastille et permet de déterminer la température du condensateur.

Le bloc de laiton constituant la tête de la cellule est adapté sur une tige de laiton que l'on peut, soit immerger dans l'azote liquide pour refroidir le condensateur jusqu'à 130°K environ, soit chauffer à l'aide d'un enroulement résistant, pour dépasser la température ambiante.

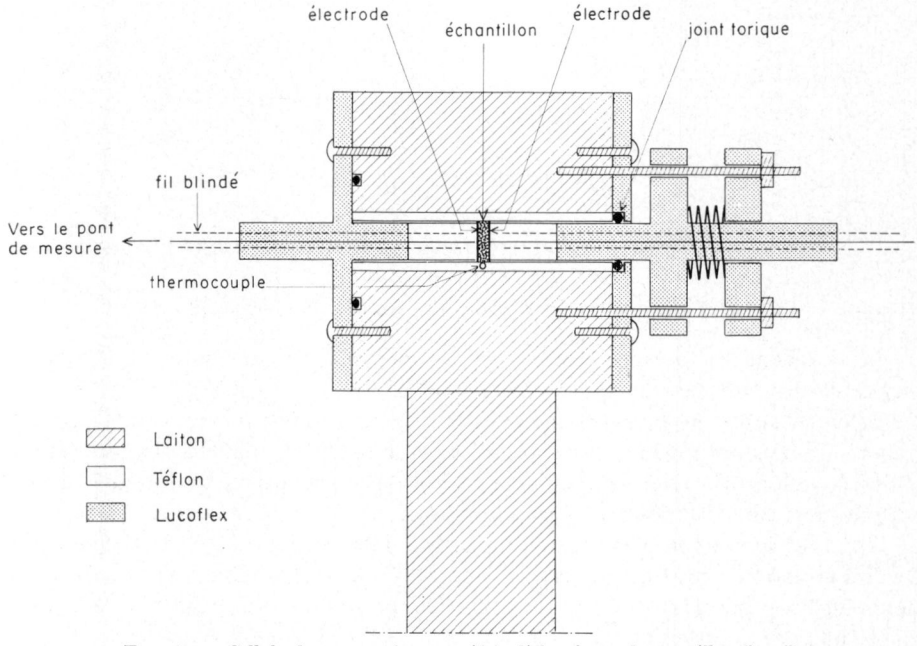


FIG. 6. — *Cellule de mesure des propriétés diélectriques des pastilles d'argile*

β) *Ensemble de mesure des caractéristiques diélectriques*

L'ensemble basses fréquences utilisé comprend :

1° un générateur de tensions alternatives à fréquences variables ;

générateur Wayne-Kerr S 121 (Précision ± 1 p. 100, pour des fréquences comprises entre 100 Hz et 20 kHz) ;

2° un pont de mesure en courant alternatif donnant directement la composante conductive G et la composante capacitive C du circuit parallèle équivalent au condensateur.

Pont Wayne-Kerr B 221.

La figure 7 donne le schéma de principe de ce pont de mesure.

On peut mesurer des valeurs de G comprises entre 10^{-11} et 10^{-1} mho avec une précision de $\pm$ 0,1 p. 100 et des valeurs de C comprises entre 10^{-15} et 10^{-5} farad, avec la même précision de $\pm$ 0,1 p. 100.

3° Un analyseur d'ondes servant de détecteur d'équilibre du pont.

Analyseur Wayne Ker A 321.

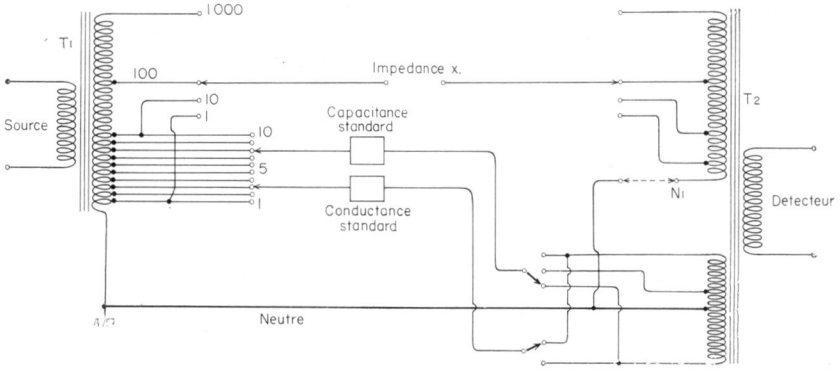


FIG. 7. — *Schéma de principe du pont de mesure Wayne Kerr B. 221*

C. — CONDITIONS ET RÉALISATION DES EXPÉRIENCES

α) *Choix de la tension appliquée au condensateur*

Les tensions (1) fournies par le pont de mesure, varient entre 0 et 30 V pour l'ensemble des gammes de mesures disponibles.

Le choix de la tension est guidé par des exigences en ce qui concerne d'une part, la sensibilité des mesures et leur stabilité dans le temps et d'autre part, la nécessité d'éviter les effet d'électrodes et de rester au-dessous du seuil à partir duquel la conductivité devient une fonction du champ appliqué.

Aux très basses températures, une variation de tension de 30 mV à une dizaine de volts ne modifie pratiquement pas l'équilibre du pont (même à la plus basse fréquence utilisée, 300 Hz), mais la sensibilité de la mesure est insuffisante au-dessous de 300 mV.

A température ambiante, l'influence de la tension sur l'équilibre du pont est surtout sensible aux basses fréquences (0,3 à 2 kHz).

La stabilité de l'équilibre du pont dans le temps est satisfaisante pour des tensions inférieures à 0,5 V, mais insuffisante au-dessus. Il se produit vraisemblablement, à mesure que la tension croît (et surtout à basse fréquence) un accroissement des effets de polarisation au niveau des électrodes.

La tension de 300 mV finalement choisie (correspondant à un champ de 1,5 $V \cdot cm^{-2}$ dans les pastilles d'argile) assure, à la fois, une stabilité d'équilibre du pont et une sensibilité de détection satisfaisantes.

(1) Toutes les valeurs données sont des tensions efficaces.

β) *Conduite d'une expérience*

La pastille d'argile étant placée dans la cellule, le bloc de laiton est refroidi à 130°K, par immersion de la tige support dans l'azote liquide. Le support est ensuite maintenu dans un vase de DEWAR, et on laisse l'ensemble revenir lentement à la température ambiante.

Lorsque la température ambiante est atteinte, on chauffe jusqu'à environ 330°K.

Au cours du réchauffement total, les caractéristiques du condensateur sont déterminées pour six fréquences comprises entre 0,3 et 10 kHz.

L'expérience dure au total 5 heures, pour l'intervalle de températures exploré, ce qui correspond à un réchauffement de 40° par heure.

γ) *Précision des mesures*

1. *Capacité et conductivité.*

La précision sur les valeurs fournies par le pont de mesure a été donnée précédemment, il faut encore estimer les erreurs introduites par le montage utilisé.

— Capacité par rapport à la masse : elle est nulle pour le pont de mesure utilisé.

— Effets de bords : pour des armatures supposées infiniment minces, et de dimensions égales à celles de l'échantillon, les effets de bords introduisent une capacité supplémentaire C_b.

Si P est le périmètre des électrodes et t la distance qui les sépare (A. R. VON HIPPEL, 1961) :

$$\frac{C_b}{P} = -\,0{,}037 + 0{,}045 \log \frac{P}{t}\ \mu\mu F/cm.$$

si l'on prend

$$t = 0{,}20\ cm \qquad P = \pi\ cm$$
$$C_b = 0{,}050\ \mu\mu F.$$

Les valeurs les plus faibles mesurées sur les pastilles d'argile sont de l'ordre de 2 $\mu\mu$F, l'erreur maximum est donc de 2,5 p. 100, mais généralement beaucoup plus faible.

— Pertes par conductivité : armatures séparées par de l'air, et distantes de 2 mm, le condensateur ne présente pas de pertes mesurables, celles-ci sont donc inférieures à 10^{-11} mho.

— Les mesures étant faites au cours du réchauffement, les erreurs les plus importantes sont dues à la rapidité avec laquelle doit être assurée la recherche de l'équilibre du pont.

2. *Température.*

Les écarts entre les températures mesurées dans le téflon, au voisinage de la pastille d'argile, et celles fournies par un thermocouple introduit dans la pastille elle-même, ne dépassent pas le demi-degré.

Compte tenu des erreurs de lecture du millivoltmètre, les températures sont déterminées avec une précision de l'ordre du degré.

δ) *Effets parasites.*

On a montré, au cours d'un précédent paragraphe, les difficultés renccontrées dans l'interprétation des mesures. Un obstacle supplémentaire peut être dû à l'apparition d'effets parasites qui sont susceptibles de perturber plus ou moins fortement les phénomènes étudiés. Les deux principaux sont présentés brièvement.

1. *L'effet Maxwell-Wagner.*

L'accumulation des charges au niveau des surfaces de séparation des différents constituants du diélectrique produit une polarisation interfaciale. Celle-ci donne lieu à un phénomène d'absorption diélectrique dont les caractéristiques sont très voisines de celles d'une absorption dipolaire (K. W. WAGNER, 1914).

La conductivité de l'eau libre entourant les solides a souvent une valeur telle qu'une relaxation du type Maxwell-Wagner peut se produire dans le domaine des ondes kilométriques.

Il est donc nécessaire de trouver des critères permettant de distinguer sans ambiguïté l'absorption dipolaire de l'effet Maxwell-Wagner.

L'influence de la température, de la fréquence, et de la teneur en eau des échantillons sur les temps de relaxation observés, peut généralement permettre de lever le doute.

2. *Des effets d'électrodes.*

Ils peuvent comprendre :

— un phénomène de polarisation aux électrodes, dont le mécanisme est mal connu, et les effets difficilement prévisibles. Ces derniers dépendent de la nature des électrodes, de la valeur et de la fréquence du champ appliqué, et de la nature du diélectrique ;

— des phénomènes d'électrolyse au contact métal-échantillon.

Pour apprécier l'importance de ces effets dans le cas des mesures sur les argiles, on a procédé à des séries de mesures sur des échantillons de différentes teneurs en eau, dans les 3 conditions suivantes :

— le diélectrique est isolé des 2 électrodes par une mince feuille de téflon (méthode « sandwich », R. ARNOULT et *al.*, 1965 ; P. DANSAS et *al.*, 1966);

— le diélectrique est isolé d'une seule électrode;

— le diélectrique n'est pas isolé des électrodes.

Compte tenu des caractéristiques de l'isolant, on peut calculer les caractéristiques du diélectrique dans les deux premiers systèmes, et comparer les valeurs obtenues à celles mesurées avec le diélectrique non isolé.

Les écarts des valeurs calculées avec les valeurs mesurées ne dépassent généralement pas quelques pour cent.

Étant donné que le but des expériences sur les argiles n'est pas de déterminer les valeurs absolues des constantes diélectriques, mais d'observer leurs variations en fonction des différents facteurs mis en jeu, on peut tenir les effets d'électrodes pour négligeables.

4. Conclusion du chapitre I

La méthode choisie et ses conditions d'application sont maintenant connues ; mais il semble important, avant de présenter l'ensemble des résultats expérimentaux obtenus, de dégager les points essentiels de ce chapitre.

Le milieu étudié constitue un diélectrique hétérogène comprenant :

1° une phase solide à l'état divisé, présentant une densité de charges superficielles élevée, compensée par la présence de cations monovalents;

2° une phase adsorbée formée de molécules d'eau soumises à des contraintes importantes par suite de la présence des cations.

Théoriquement, les trois constituants du milieu : l'argile, les cations et l'eau, peuvent jouer un rôle dans les propriétés diélectriques de l'ensemble.

Le réseau silicaté, en raison des fréquences utilisées, ne peut avoir qu'un rôle passif, et par suite les phénomènes intéressants sont localisés à la surface des cristallites, c'est-à-dire au niveau du film d'eau. Ce sont précisément les propriétés de ce film d'eau qui sont déterminantes dans les caractéristiques diélectriques du système.

On peut s'attendre à rencontrer les types d'effets suivants :

— des effets de conductivité par porteurs libres.

Les cations, qui peuvent éventuellement jouer un rôle de porteurs de charges, perturbent la structure des couches d'eau adsorbée. Ils favorisent ainsi la création ou le déplacement de défauts de charges (protons ou lacunes) responsables de la conductivité.

— des effets d'absorption dipolaire dus à des mouvements de rotation des molécules adsorbées.

— des effets du type Maxwell-Wagner, dus à l'hétérogénéité du diélectrique.

— des effets liés à des changements de phase puisque le domaine de températures couvert comprend la zone de transition solide-liquide de l'adsorbat.

Étant données les difficultés d'interprétation de ces différents phénomènes ce sont essentiellement les aspects globaux des mesures diélectriques qui seront exposés au cours du prochain chapitre. Nous nous sommes cependant efforcé de différencier et d'analyser les mécanismes élémentaires associés dans ces effets globaux.

Nous nous sommes enfin attaché à évaluer l'influence de la nature des cations compensateurs et des états d'hydratation sur le comportement diélectrique de la montmorillonite.

CHAPITRE II

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Nous présentons dans ce chapitre, l'ensemble des résultats expérimentaux des mesures diélectriques sans en aborder immédiatement l'interprétation. Cette dernière, appuyée sur les travaux de BJERRUM et de GRANICHER, sera donnée séparément dans le chapitre III, afin de nous permettre par la suite une confrontation et une liaison plus aisées avec les résultats obtenus par les autres techniques utilisées dans ce travail.

Le tableau 5 résume les principaux résultats des mesures des propriétés diélectriques des différents échantillons de montmorillonite.

1. Présentation des données

Différentes représentations graphiques permettent de faire apparaître les aspects les plus significatifs des mesures de propriétés diélectriques.

a) *Pertes diélectriques globales*

Les figures 8 et 9 résument, pour une fréquence de 1 000 Hz et à des températures de + 20°C et — 50°C, l'évolution de la conductivité globale des différents échantillons de montmorillonite, en fonction de la teneur en eau.

L'aspect et la distribution des courbes sont les mêmes aux cinq autres fréquences utilisées. Cependant, la conductivité d'un système déterminé croît avec la fréquence, mais ce fait ne modifie pas l'interprétation d'ensemble des résultats expérimentaux.

— La teneur en eau désignée par 0 p. 100 correspond en fait à des traces qu'il est impossible d'éliminer sans risquer de modifier la structure du réseau cristallin. Ces traces sont vraisemblablement responsables des différences de conductivité qui apparaissent dès l'origine, entre les quatre échantillons.

— A une teneur en eau donnée, la conductivité de la montmorillonite varie suivant la nature du cation échangeable.

Avec les cations monovalents, on observe le classement :

$\sigma_{Cs} < \sigma_{K} < \sigma_{Na}$ qui suit l'ordre de décroissance des rayons ioniques. Cependant, le lithium fait exception puisque la conductivité qui lui correspond est, en particulier aux basses teneurs en eau, voisine de celle du césium (rappelons qu'en ce qui concerne la cohésion interfeuillets, un rapprochement a été également signalé entre les montmorillonites Li et Cs).

— Au-dessus de 25 p. 100 d'eau adsorbée, la conductivité paraît tendre vers une valeur limite maximum. C'est en effet ce qui a été observé par R. WEILER (1966) sur les mêmes systèmes argile-cation : aux teneurs en eau comprises entre 30 p. 100

TABL

Échantillon	Montmorillonite Li			Montmorillonite	
Phénomène observé	Domaine de températures (°K)	Teneur en eau (%)	Énergie d'activation	Domaine de températures (°K)	Teneur en eau (%)
Absorption dipolaire	~ 200	2 à 6	0,48 *e*V 11 kcal·mole^{-1}	~ 175	2 à 10
Conductivité	130 à 230	0 à 20	0,15 *e*V 3,5 kcal·mole^{-1}	130 à 230	0 à 20
	200 à 273	0 à 20	à 5 % d'eau : 0,40 *e*V 9 kcal·mole^{-1}	200 à 273	0 à 20
	> 273	5 à 20	à 20 % d'eau : 0,26 *e*V 6 kcal·mole^{-1}	> 273	5 à 20
Effet Maxwell-Wagner	> 200	5 à 20 effet maximum à 18		> 200	5 à 20 effet maximum à 18

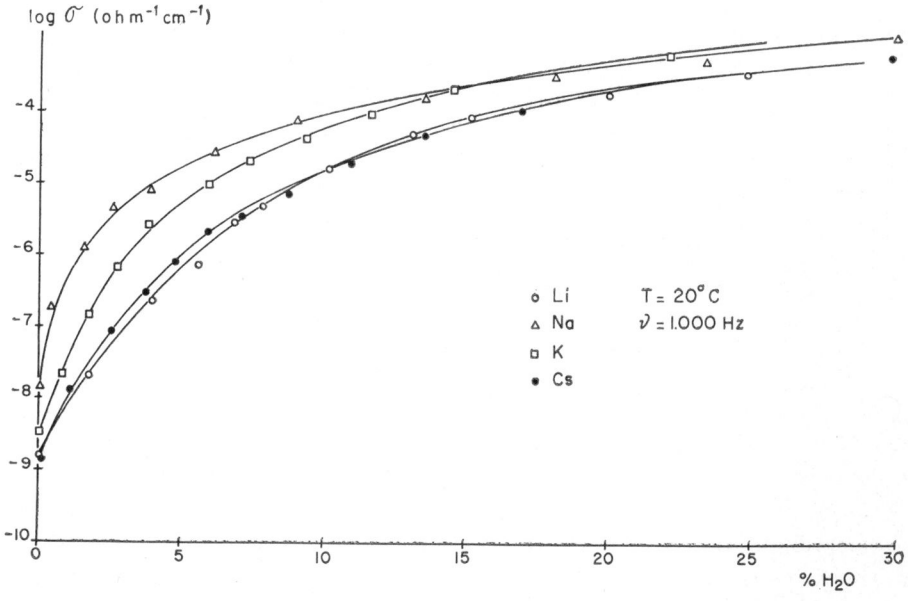


FIG. 8. — *Conductivité globale de la montmorillonite en fonction de la teneur en eau*

EAU 5

Na	Montmorillonite K			Montmorillonite Cs		
Énergie d'activation	Domaine de températures (°K)	Teneur en eau (%)	Énergie d'activation	Domaine de températures (°K)	Teneur en eau (%)	Énergie d'activation
0,61 *eV* 14 kcal·mole^{-1}	~ 170	4 à 18	0,55 *eV* 12,5 kcal·mole^{-1}	Absorption dipolaire très faible		
0,15 *eV* 3,5 kcal·mole^{-1}	130 à 230	0 à 20	0,15 *eV* 3,5 kcal·mole^{-1}	130 à 230	0 à 20	0,15 *eV* 3,5 kcal·mole^{-1}
à 5 % d'eau : 0,46 *eV* 10,5 kcal·mole^{-1}	200 à 273	0 à 20	à 5 % d'eau : 0,44 *eV* 10 kcal·mole^{-1}	200 à 273	0 à 20	à 5 % d'eau : 0,42 *eV* 9,6 kcal·mole^{-1}
à 20 % d'eau : 0,22 *eV* 5 kcal·mole^{-1}	> 273	5 à 20	à 20 % d'eau : 0,20 *eV* 4,5 kcal·mole^{-1}	> 273	5 à 20	à 20 % d'eau : 0,24 *eV* 5,5 kcal·mole^{-1}
	> 200	5 à 20 effet max. à 19		> 200	5 à 20 effet max. à 18	

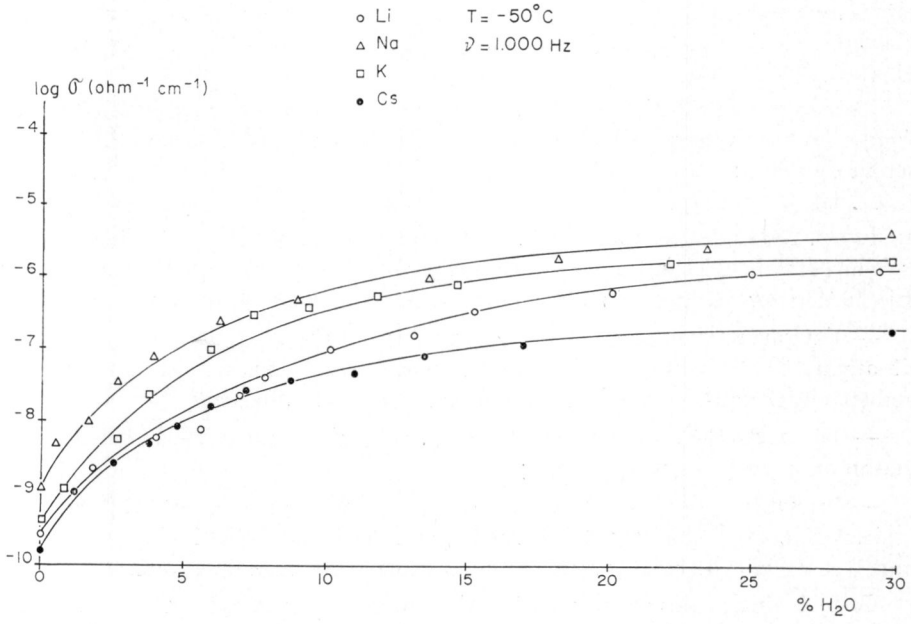


FIG. 9. — *Conductivité globale de la montmorillonite en fonction de la teneur en eau*

et 50 p. 100, la conductivité est sensiblement constante, et lorsque la teneur en eau dépasse 50 p. 100, la conductivité décroît. L'eau libre qui constitue alors une part importante du milieu, a des propriétés très différentes de l'eau adsorbée (en particulier, sa conductivité est beaucoup plus faible), et forme un obstacle aux transferts de charges entre particules d'argile.

— Si la présence de l'eau libre est bien responsable de la limite atteinte par la conductivité du milieu, cela signifie que cette conductivité est essentiellement due aux propriétés particulières des molécules d'eau constituant les premières couches d'eau adsorbée. Ce rôle ne peut en effet être attribué aux cations dont la mobilité est vraisemblablement très faible aux basses teneurs en eau.

b) *La représentation* $\log \varepsilon'' = f(1/T)$

Les fonctions $\log \varepsilon'' = f(1/T)$ (ou $\log \sigma = f(1/T)$, on passe de l'une à l'autre par une simple translation d'ordonnée puisque $\sigma = \omega \varepsilon''$) permettent de mettre en évidence des zones de températures où les conductivités suivent une loi du type :

$$\sigma = \sigma_0 \, e^{-Q/kT} \tag{17}$$

Cette relation a la forme générale de l'équation des conductivités résultant d'un déplacement de charges libres.

Q est l'énergie d'activation nécessaire pour la migration du porteur de charge, σ_0 un terme constant, et T la température absolue.

D'après l'équation (17), la fonction $\log \varepsilon'' = f(1/T)$ est une droite.

Les figures 10 à 13 donnent les courbes représentatives des fonctions $\log \varepsilon'' = f(1/T)$ pour la montmorillonite, à une fréquence de 1 000 Hz, et pour des états d'hydratation correspondant à des humidités relatives comprises entre 0 p. 100 et 100 p. 100 (l'aspect général des courbes est analogue pour les autres fréquences utilisées).

La figure 14 (dérivée de la fig. 12) permet de résumer cette évolution, et de dégager les principales indications fournies par la représentation logarithmique du facteur de perte :

— les courbes 14-1 et 14-2 (qui correspondent respectivement à des teneurs en eau de 1 p. 100 et de 2 p. 100) comportent deux parties linéaires qui traduisent l'existence de deux mécanismes de conductivité formulables par une équation du type (17), mais mettant en jeu deux énergies d'activation différentes Q_1 et Q_2 ;

— l'augmentation de la teneur en eau (courbe 14-3, teneur en eau de 4 p. 100) fait apparaître, à basse température, un phénomène à maximum superposé à la conductivité, et au-dessus de 273°K une nouvelle partie linéaire ;

— la courbe 14-4 (teneur en eau 12 p. 100) révèle un nouveau phénomène à maximum, à moyenne température ;

— la courbe 14-5 (teneur en eau 20 p. 100) ne révèle pratiquement plus de phénomènes d'absorption à basse température, mais les trois parties linéaires sont maintenues, et un saut de conductivité se manifeste au voisinage de 273°K.

Cette évolution des courbes en fonction de la teneur en eau est sensiblement la même pour les quatre échantillons de montmorillonite. L'influence du cation échan-

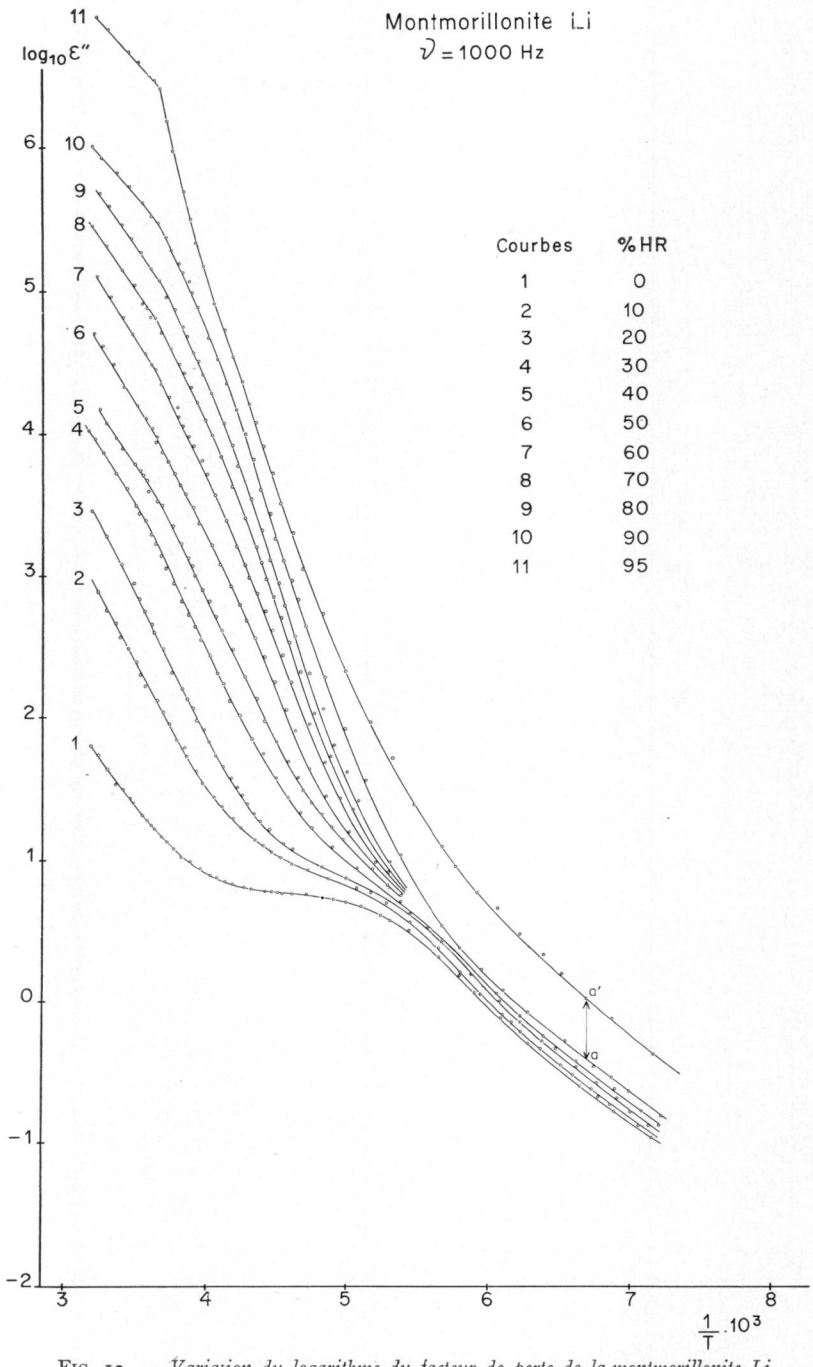


FIG. 10. — *Variation du logarithme du facteur de perte de la montmorillonite Li en fonction de l'inverse de la température absolue*

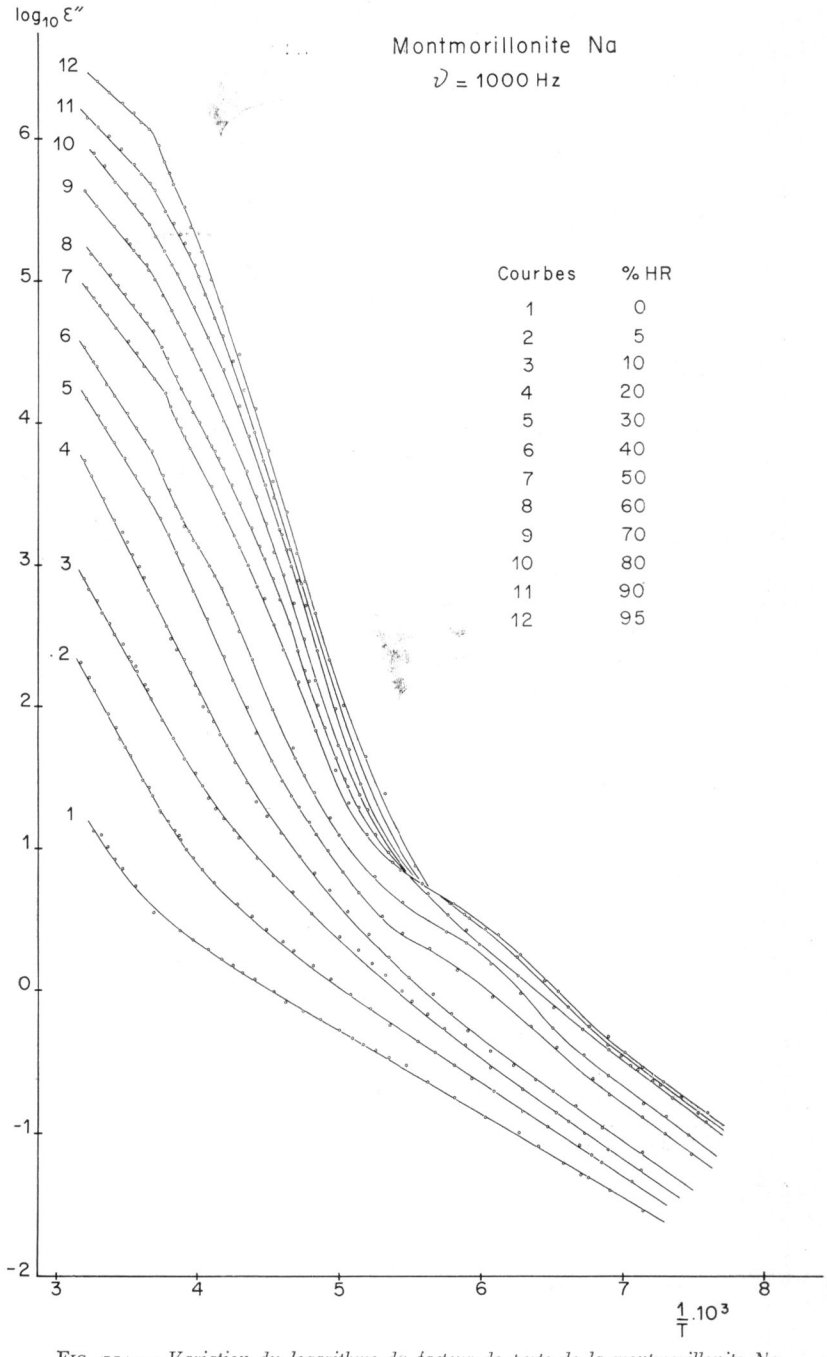


FIG. 11. — *Variation du logarithme du facteur de perte de la montmorillonite Na en fonction de l'inverse de la température absolue*

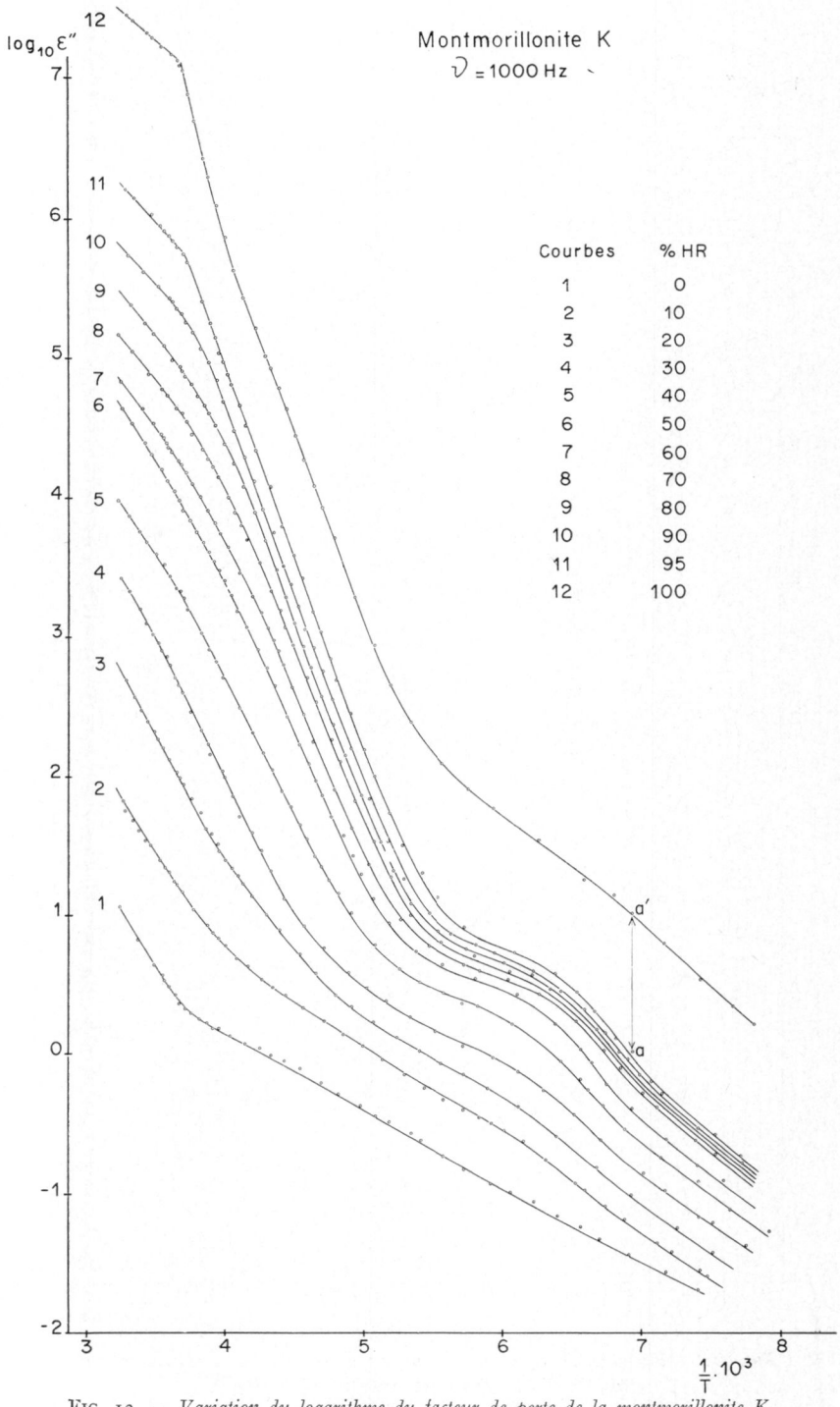


FIG. 12. — *Variation du logarithme du facteur de perte de la montmorillonite K en fonction de l'inverse de la température absolue*

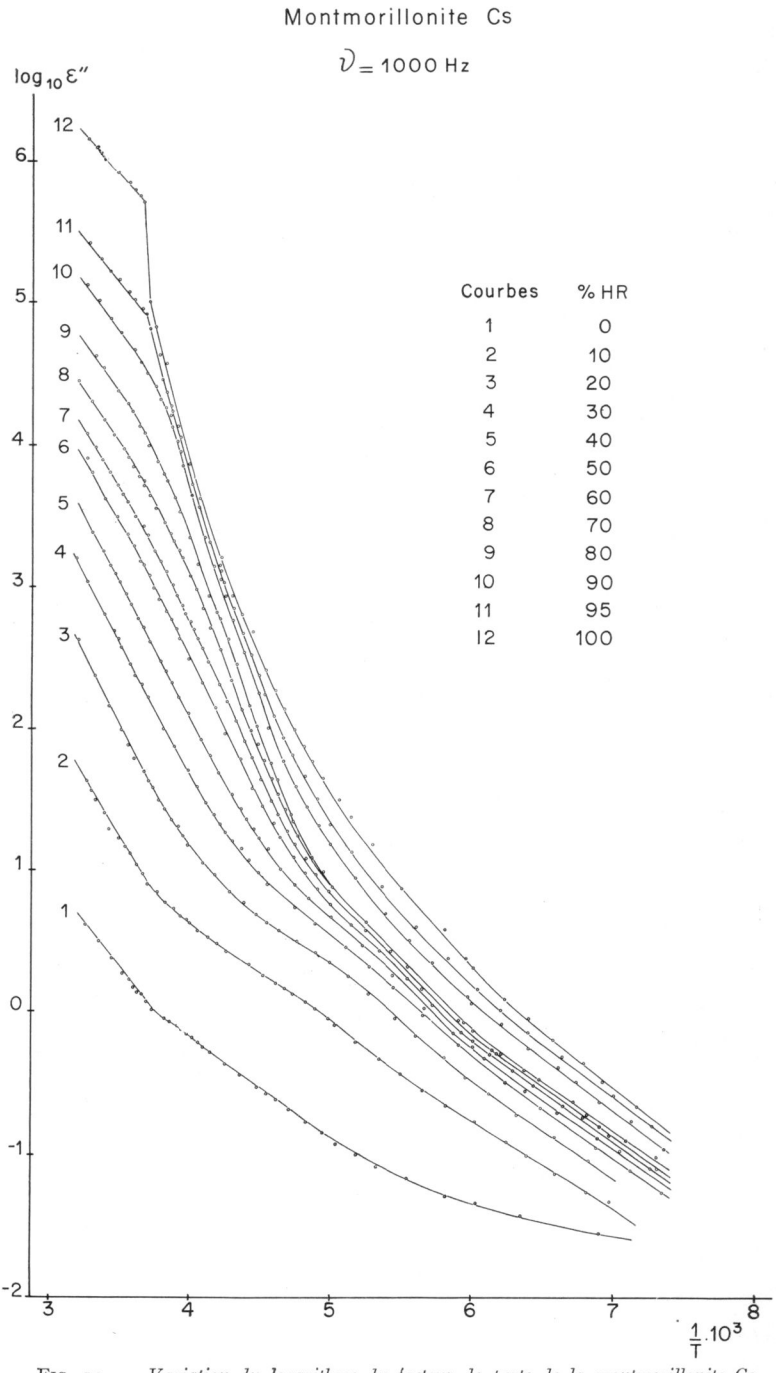


FIG. 13. — *Variation du logarithme du facteur de perte de la montmorillonite Cs en fonction de l'inverse de la température absolue*

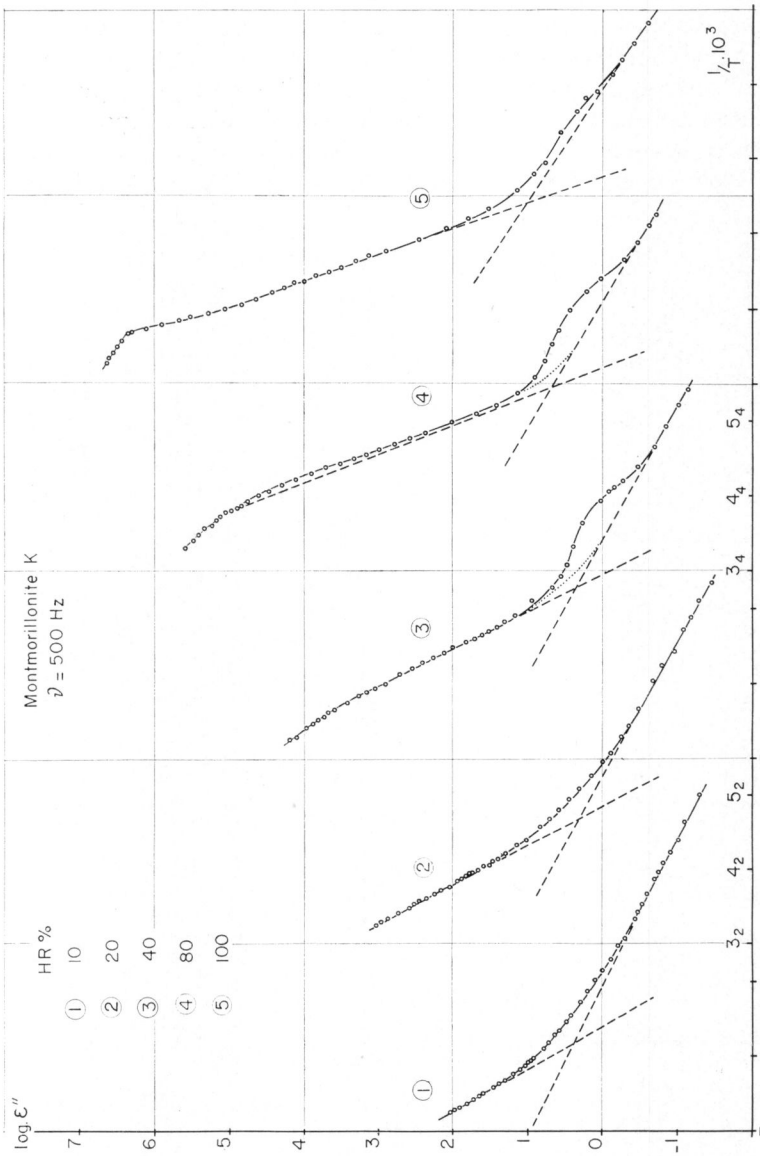


FIG. 14. — *Influence de la teneur en eau sur la variation du facteur de perte*

geable, se manifeste dans la distribution des courbes, les pentes des parties linéaires, l'intensité et les domaines d'existence de l'absorption à basse température. Nous reviendrons par la suite sur ces différents aspects du problème.

c) *La représentation tg* $\delta = f(T)$

La représentation usuelle tg $\delta = f(T)$ souligne particulièrement l'existence des deux absorptions diélectriques signalées dans le précédent paragraphe. La figure 15, établie pour le cas de la montmorillonite Na, révèle que le pic le plus intense est extrêmement sensible aux variations de composition du milieu. Cependant, la représentation en tg δ, compte tenu du fait qu'il s'agit d'un rapport, ne permet pas de pousser très loin l'analyse des phénomènes diélectriques, et ne sera donc que peu utilisée.

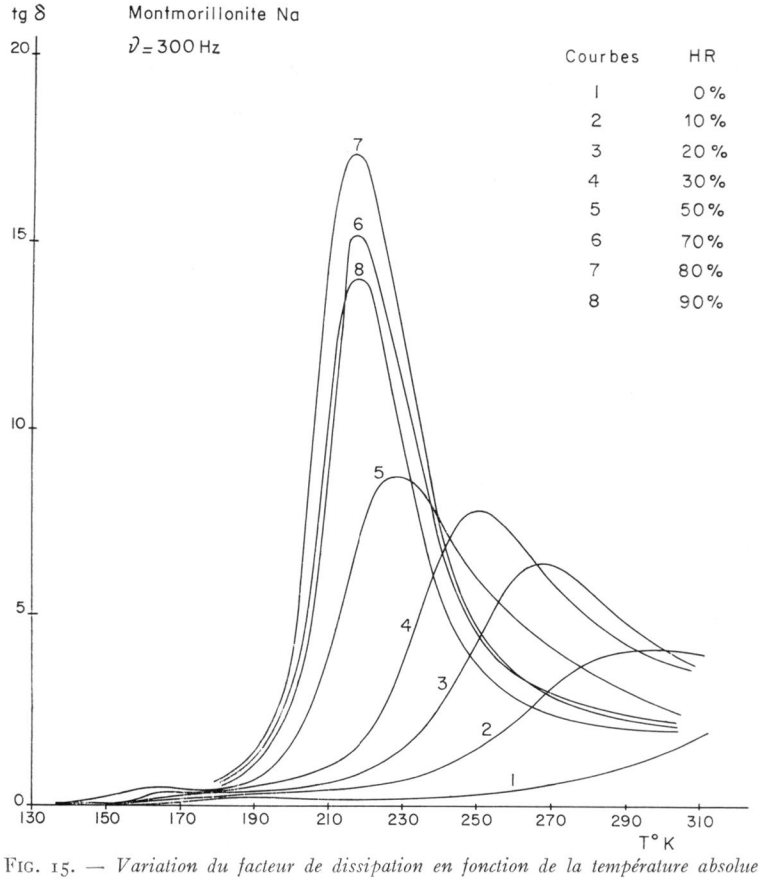


FIG. 15. — *Variation du facteur de dissipation en fonction de la température absolue*

2. Décomposition des valeurs globales

Les phénomènes responsables des pertes diélectriques dans les systèmes étudiés au cours de ce travail peuvent être groupés essentiellement en trois catégories distinctes :

— *Les pertes par conductivité,* provoquées par la migration de charges libres dans le milieu.

— *L'effet Maxwell-Wagner* qui est un phénomène d'absorption associé à la conductivité.

— *Les pertes par absorption de relaxation* liées à des mouvements dipolaires.

Ces différents types de phénomènes peuvent exister simultanément dans des domaines définis de température et d'hydratation.

A partir d'une teneur en eau variable avec la nature du cation échangeable, les courbes représentatives des variations de ε'' en fonction de la température, ou les courbes $\log \varepsilon'' = f(1/T)$ (fig. 10 à 13), présentent des maxima qui peuvent, *a priori*, être considérés comme résultant de phénomènes d'absorption dipolaire ou d'effet Maxwell-Wagner.

On a vu que le facteur de perte global ε'', proportionnel à la composante conductive du diélectrique, traduit la perte totale d'énergie W par unité de volume du milieu, soumis à un champ électrique alternatif de pulsation ω et d'amplitude maximum E_0.

Des équations (15) et (16), on déduit :

$$W = \frac{\omega E^2_0}{8 \pi} \varepsilon'' = \frac{\omega}{8 \pi} D_0 E_0 \sin \delta \tag{18}$$

Si, à une température donnée coexistent un phénomène de perte par conductivité (facteur de perte ε''_c) et un phénomène de perte par absorption (facteur de perte ε''_a), les énergies mises en jeu sont :

$$W_c = \frac{\omega E^2_0}{8 \pi} \varepsilon''_c \tag{19}$$

$$W_a = \frac{\omega E^2_0}{8 \pi} \varepsilon_a' \tag{20}$$

et la perte totale d'énergie dans le diélectrique est

$$W = W_c + W_a = \frac{\omega E^2_0}{8 \pi} (\varepsilon''_c + \varepsilon''_a) \tag{21}$$

ce qui entraîne, d'après (18)

$$\varepsilon'' = \varepsilon''_c + \varepsilon''_a \tag{22}$$

D'autre part, d'après (15) :

$$\varepsilon''_c = \frac{D_0}{E_0} \sin \delta_c \tag{23}$$

$$\varepsilon''_a = \frac{D_0}{E_0} \sin \delta_a \tag{24}$$

et (22) s'écrit :

$$\varepsilon'' = \frac{D_0}{E_0} (\sin \delta_c + \sin \delta_a) \tag{25}$$

d'où, d'après (18)

$$\sin \delta = \sin \delta_c + \sin \delta_a \tag{26}$$

si δ_c et δ_a restent petits ($< 0{,}3$ radians), on peut écrire :

$$\delta = \delta_c + \delta_a \tag{27}$$

et enfin :

$$\operatorname{tg} \delta = \operatorname{tg} \delta_c + \operatorname{tg} \delta_a \tag{28}$$

Les expressions (22) et (27) montrent que les facteurs de pertes et les angles de pertes de deux phénomènes de pertes diélectriques simultanés peuvent être additifs. Cette conclusion est importante car elle permet d'élargir la portée des mesures globales effectuées sur la montmorillonite.

Les maxima à basse température des courbes globales $\varepsilon'' = f(T)$ et $\operatorname{tg}\delta = f(T)$ résultent en effet de la superposition (à partir d'une teneur en eau donnée) d'un phénomène d'absorption de relaxation au phénomène de conductivité préexistant. Si les conditions d'application des règles d'additivité énoncées ici sont respectées, la détermination des paramètres ε'', $\operatorname{tg}\delta$ et ε', définissant chacun des deux phénomènes est possible.

3. Étude des phénomènes de conductivité

La conductivité due à la migration d'une particule chargée s'exprime par la relation :

$$\sigma = ue^2Z^2n$$

où u est la mobilité de la particule, Ze sa charge ionique, et n la concentration en particules par unité de volume.

D'une façon générale, la mobilité d'un porteur de charge dépend exponentiellement de la température ; il en résulte que l'expression de la conductivité peut être écrite sous la forme (N. F. Mott, R. W. Gurney, 1940 ; W. Jost, 1960) :

$$\sigma = A \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \tag{30}$$

Q est la barrière d'énergie franchie par la particule passant d'une position d'équilibre à une autre, elle est classiquement considérée comme l'énergie d'activation du processus de conductivité mis en jeu.

Cette expression est vérifiée expérimentalement dans de nombreux cas (diffusion d'ions dans les cristaux ioniques, défauts de Schottky ou de Frenkel, diffusion dans les liquides ...), et lorsque l'intervalle de températures couvert est assez étendu, on peut observer plusieurs domaines de conductivité, qui peuvent en plus donner lieu à la manifestation d'effets du type Maxwell-Wagner.

Dans le cas de la montmorillonite, on met en évidence deux ou trois domaines de conductivité auxquels l'équation (30) est applicable. Deux d'entre eux apparaissent, quelle que soit la teneur en eau, le troisième seulement aux teneurs supérieures à 8 p. 100 environ (et pour les températures supérieures à 273°K).

a) *Domaines de conductivité aux basses et moyennes températures* ($T < 273°K$)

Les figures 10 à 14 montrent que, quel que soit le cation compensateur, la montmorillonite manifeste, dès les plus faibles hydratations, deux domaines de conductivité, répondant à l'équation (30). Il apparaît, en effet, deux parties linéaires sur chaque courbe de la représentation $\log \varepsilon'' = f(1/T)$. Ces conductivités sont par conséquent liées à la migration de charges libres à travers le milieu. Les hauteurs des barrières de potentiel Q, que les porteurs de charges franchissent dans les processus de conductivité, sont directement proportionnelles aux pentes des deux parties linéaires.

Les deux domaines de conductivité correspondent donc, soit à l'existence de deux porteurs de charges différents, soit à deux processus différents de migration du même porteur. Chacun des deux mécanismes mis en jeu apparaît ou prédomine dans un certain intervalle de températures. L'abaissement de la température favorise le mécanisme de moindre énergie.

Différentes hypothèses sont susceptibles d'expliquer l'allure de ces courbes, formées de deux parties linéaires raccordées par une courbure plus ou moins étendue.

A. SMEKAL (1927) a, le premier, apporté une hypothèse justifiant cette forme de courbe dans le cas des solides : la conductivité mesurée est la somme de deux termes, l'un dû aux charges du réseau, l'autre aux charges de surface. Les premières sont beaucoup plus nombreuses que les secondes, mais nécessitent une énergie d'activation de migration beaucoup plus élevée. Le refroidissement favorise donc la conductivité de surface qui devient prépondérante au-dessous d'une température déterminée.

Dans le cas des argiles, la conductivité du réseau silicaté doit être très faible, et les conductivités observées sont essentiellement des conductivités de surface (R. WEILER, 1966) ; l'hypothèse de SMEKAL n'est donc pas applicable.

La deuxième hypothèse (W. JOST 1960) s'applique à la conductivité par défauts de réseau (et particulièrement aux défauts de Schottky qui sont des vacances positives et négatives). La création d'un défaut résulte d'un désordre de structure qui requiert une énergie de formation W. La migration du défaut nécessite à son tour une énergie U, au total la conductivité s'écrit :

$$\sigma = \sigma_1 \exp\left(-\frac{W + U}{RT}\right) \tag{31}$$

Au-dessous d'une température T_0, le réseau est « gelé », la création d'un désordre devient impossible, et la conductivité n'est plus assurée que par les défauts préexistant au moment où la température T_0 est atteinte. La conductivité s'écrit alors :

$$\sigma = \sigma_1 \exp\left(-\frac{W}{RT_0}\right) \exp\left(-\frac{U}{RT}\right) \tag{32}$$

La fonction $\log \sigma = f(1/T)$ déduite de (32) est représentée, dans un intervalle suffisamment étendu de températures, par deux segments de droites de pentes différentes (correspondant à W + U et à U).

Cette hypothèse est en bon accord avec différents résultats expérimentaux concernant les cristaux ioniques (H. G. BRECKENRIDGE, 1948), et semble applicable, dans son principe, au cas de la montmorillonite. Cependant, elle fixe une température de transition précise T_0 entre les deux domaines de conductivité, alors que dans le cas de la montmorillonite, ceux-ci se raccordent par une zone incurvée couvrant une cinquantaine de degrés. Il semble donc nécessaire de considérer qu'il s'agit de la superposition de deux mécanismes et non de leur succession suivant des équations du type (31) et (32). Dans ces conditions, l'équation de la conductivité prend la forme :

$$\sigma = A \exp\left(-\frac{Q_1}{RT}\right) + B \exp\left(-\frac{Q_2}{RT}\right) \tag{33}$$

avec $Q_2 > Q_1$ et $B > A$

L'énergie Q_2 est sensiblement le double de l'énergie Q_1.

Il existe bien alors une zone où les deux termes de l'équation (33) sont du même ordre de grandeur, ce qui justifie l'existence d'une zone de raccordement étendue entre les deux parties linéaires. En dehors de cette zone, l'un des termes devient négligeable devant l'autre.

On peut aisément vérifier qu'une équation de la forme (33) rend compte de l'allure des courbes de conductivité établies pour la montmorillonite. La figure 16 en donne un exemple. On peut en effet constater que pour tout point de la zone incurvée, à une température T donnée : $\log \varepsilon'' = \log (\varepsilon''_1 + \varepsilon''_2)$. C'est-à-dire que $\log \sigma = \log (\sigma_1 + \sigma_2)$. où σ_1 et σ_2 sont des fonctions exponentielles de la température.

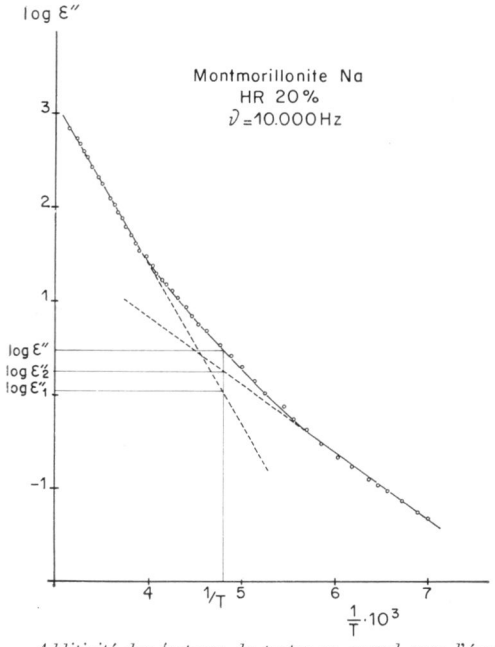


FIG. 16. — *Additivité des facteurs de pertes en accord avec l'équation (33)*

En conséquence, la conductivité totale doit être attribuée à la coexistence de deux mécanismes différents, mettant en jeu les énergies d'activation Q_1 et Q_2. Q_1 correspond à la conductivité du domaine de basse température et Q_2 à celle du domaine de moyenne température.

Les énergies Q_1 et Q_2, déduites des courbes $\log \varepsilon'' = f(1/T)$ pour les quatre échantillons de montmorillonite, sont portées, en fonction des quantités d'eau adsorbée, sur les graphiques de la figure 17.

— L'énergie d'activation Q_1 du mécanisme de conductivité de basse température est pratiquement indépendante de la quantité d'eau adsorbée et de la nature du cation compensateur, elle vaut environ 3 kcal·mole^{-1} (0,15 *e*V.).

— Les énergies d'activation Q_2 du domaine des moyennes températures croissent sensiblement avec la quantité d'eau adsorbée, elles varient entre 8 et 14,5 kcal·mole^{-1} (0,35 à 0,65 *e*V). Le cation paraît jouer un rôle plus direct que dans le premier cas, puisque les énergies Q_2 se classent dans l'ordre, $Q_{2Li} < Q_{2Cs} < Q_{2K} > Q_{2Na}$ (c'est aussi l'ordre de classement des conductivités).

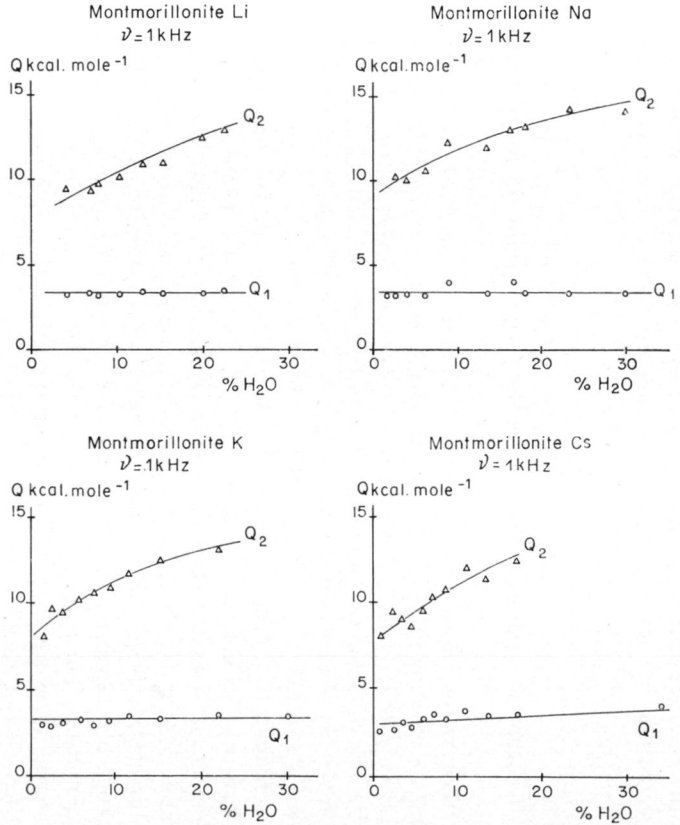


FIG. 17. — *Variation des énergies d'activation des conductivités des basses et moyennes températures, en fonction de la teneur en eau*

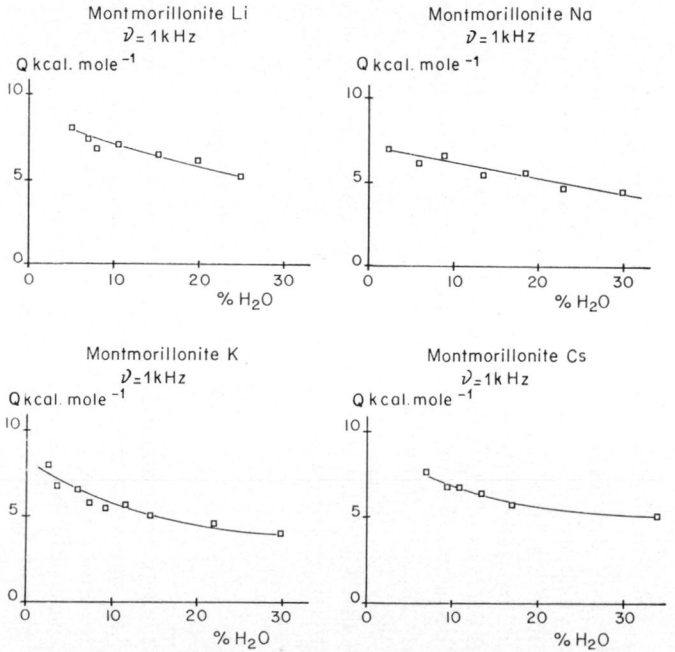


FIG. 18. — *Variation des énergies d'activation de la conductivité des températures > 273°K, en fonction de la teneur en eau*

b) *Domaine de conductivité de haute température* ($T > 273°K$)

Les deux domaines de conductivité présentés dans le paragraphe précédent sont les seuls observables jusqu'à une teneur en eau d'environ 8 p. 100. Lorsque cette hydratation est dépassée, il apparaît, sur les courbes $\log \varepsilon'' = f(1/T)$, un nouveau domaine linéaire, à partir de 273°K.

Les énergies d'activation de ce troisième domaine (fig. 18) diminuent à mesure que la teneur en eau croît, contrairement à ce qui se passe pour le domaine de moyenne température. Elles varient entre 4 et 8 kcal·mole^{-1} (0,17 à 0,35 *e*V), et se classent dans l'ordre $Q_{Li} > Q_{Cs} > Q_{Na} > Q_K$, qui est l'ordre inverse de celui apparaissant au-dessous de 273°K. Cette observation peut faire penser que le mécanisme de conductivité mis en jeu est tout à fait différent de ceux qui interviennent au-dessous de 273°K.

4. Effet Maxwell-Wagner

Sur la représentation $\operatorname{tg} \delta = f(T)$, on observe des pics d'absorption intenses dans la zone des moyennes températures (fig. 15). La position et l'intensité des maxima sont très sensibles aux variations de teneurs en eau, et par suite aux variations de conductivité du milieu. L'énergie d'activation que l'on peut déduire de ces courbes est égale à celle de la conductivité qui se manifeste dans le même domaine de température.

Le phénomène observé peut être considéré comme un effet du type Maxwell-Wagner. Celui-ci est provoqué par la présence de barrières qui s'opposent au mouvement des porteurs libres. Ces barrières sont ici dues à la nature hétérogène du diélectrique, c'est-à-dire au caractère discontinu du milieu (K. W. WAGNER, 1914 ; R. W. SILLARS, 1937 ; J. R. MCDONALD, 1953).

5. Étude des phénomènes d'absorption diélectrique de relaxation

Le phénomène d'absorption de relaxation observé dans le cas de la montmorillonite se superpose au domaine de conductivité à basse température. Une décomposition des valeurs globales, en conductivité et en absorption, peut cependant être entreprise, car ce domaine présente des angles de perte inférieurs à 0,3 radian.

La figure 19 résume, sur un exemple, la détermination des éléments caractéristiques de l'absorption, à partir des valeurs expérimentales.

Pour obtenir la courbe représentant la conductivité seule, on prolonge les deux parties linéaires des graphiques $\log \sigma = f(1/T)$, de façon à reconstituer la zone de raccordement entre les deux types de conductivité (cf. fig. 16 et 19 *a*), ce qui revient à déterminer l'équation (33). La conductivité totale ainsi obtenue est reportée en valeurs directes sur le graphique expérimental $\varepsilon'' = f(T)$ (fig. 19 *b*, courbe en tireté) ; la différence par rapport aux valeurs globales donne le terme ε''_d correspondant à l'absorption seule (fig. 19 *c*).

Le terme $\operatorname{tg} \delta_d$ est obtenu simplement sur les courbes $\operatorname{tg} \delta = f(T)$, en traçant le fond (fig. 19 *d* et 19 *e*).

ε'_d est calculé à partir de ε''_d et tg δ_d

$$\varepsilon'_d = \varepsilon''_d / \text{tg } \delta_d \text{ (fig. 19 } g\text{)}$$

La même procédure a été suivie pour l'ensemble des mesures expérimentales, à toutes les fréquences, et à toutes les teneurs en eau.

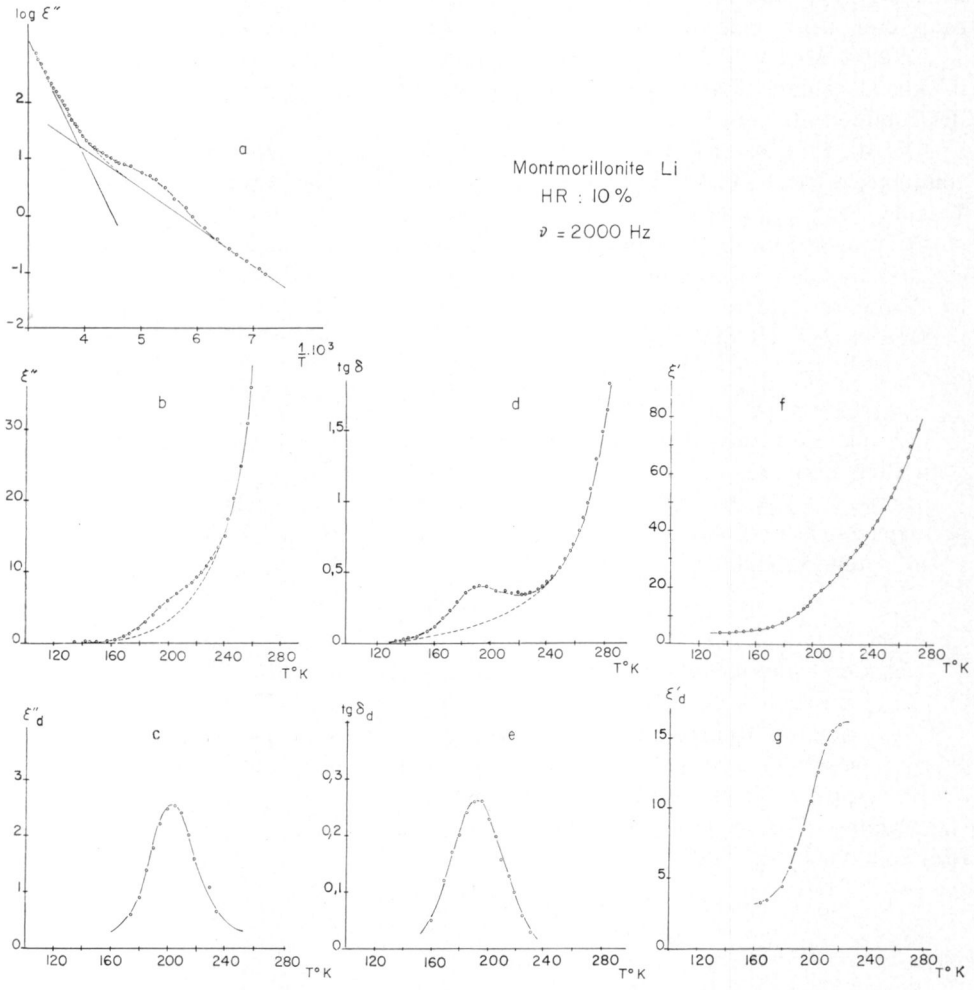


FIG. 19. — *Décomposition des valeurs globales des caractéristiques diélectriques*

a) *Nature de l'absorption*

Les caractères d'une absorption dipolaire Debye (BOTTCHER 1952) semblent clairement apparaître sur les courbes. En raison de la nature hétérogène du diélectrique, il faut, cependant, avant d'interpréter les résultats sur la base d'une absorption

dipolaire, éliminer la possibilité d'un effet du type Maxwell-Wagner. Étant donnée la forte concentration en impuretés, le test de G. GROSVALD (1966) ne s'applique pas, mais on peut avancer les arguments suivants :

L'effet Maxwell-Wagner étant lié à l'hétérogénéité du milieu, les variations de teneur en eau devraient provoquer des variations importantes du phénomène (comparables à celles observées pour l'absorption à moyenne température, fig. 15), or les absorptions aux basses températures se manifestent de façon sensiblement constante dans des domaines étendus d'hydratation (ex. fig. 10 et 12).

L'effet Maxwell-Wagner est très sensible aux variations de conductivité du milieu, alors que les absorptions observées ne sont pas affectées par les variations des conductivités qui les accompagnent.

R. W. SILLARS (1937) a montré que pour un diélectrique constitué de sphères conductrices noyées dans un milieu non conducteur, une absorption du type Maxwell-Wagner peut se produire dans le domaine des radiofréquences, mais B. V. HAMON (1953) utilisant un diélectrique formé de sphéroïdes non conductrices entourées de couches conductrices, n'a pas décelé d'absorption ; or les systèmes argile-eau, dans les domaines d'hydratation où apparaissent les absorptions, sont plus proches du système de HAMON que de celui de SILLARS.

b) *Caractéristiques de l'absorption*

Les manifestations de l'absorption à basse température peuvent donc être reliées à un effet de relaxation de dipôles contenus dans le milieu diélectrique.

Lorsque les pertes diélectriques sont dues à un effet de relaxation des dipôles permanents, la permittivité complexe, si l'on s'en tient au formalisme de DEBYE (1929), prend la forme :

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + j\,\omega\,\tau} \tag{34}$$

ε_s Constante diélectrique pour un champ électrique statique.
ε_∞ Constante diélectrique pour un champ électrique de fréquence infinie.
τ ayant les dimensions d'un temps, est appelé temps de relaxation, et correspond au temps mis par le dipôle pour revenir à sa position d'équilibre après avoir été orienté dans un champ électrique.

Comme, d'autre part (équation 10) : $\varepsilon^* = \varepsilon' - j\,\varepsilon''$, en séparant les parties réelles et imaginaires de (34), on obtient :

$$\varepsilon' = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + \omega^2\,\tau^2} \tag{35}$$

$$\varepsilon'' = (\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)\,\frac{\omega\,\tau}{1 + \omega^2\tau^2} \tag{36}$$

La courbe représentative de la fonction $\varepsilon'' = f(\omega)$ (ou $\varepsilon'' = f(\nu)$ puisque $\omega = 2\,\pi\,\nu$) passe par un maximum pour $\omega = 1$, la fréquence correspondante ν_c est appelée fréquence critique.

En conséquence, la détermination expérimentale de la fonction $\varepsilon'' = f(\nu)$ permet de connaître le temps de relaxation des dipôles responsables de l'absorption :

$$\tau = \frac{1}{\omega_m} = \frac{1}{2\pi\nu_c} \tag{37}$$

1° *Temps de relaxation dipolaire*

Pour la plupart des diélectriques, les courbes $\varepsilon' = f(\omega)$ et $\varepsilon'' = f(\omega)$, obtenues expérimentalement, ne suivent pas exactement les équations (35) et (36). Ces équa-

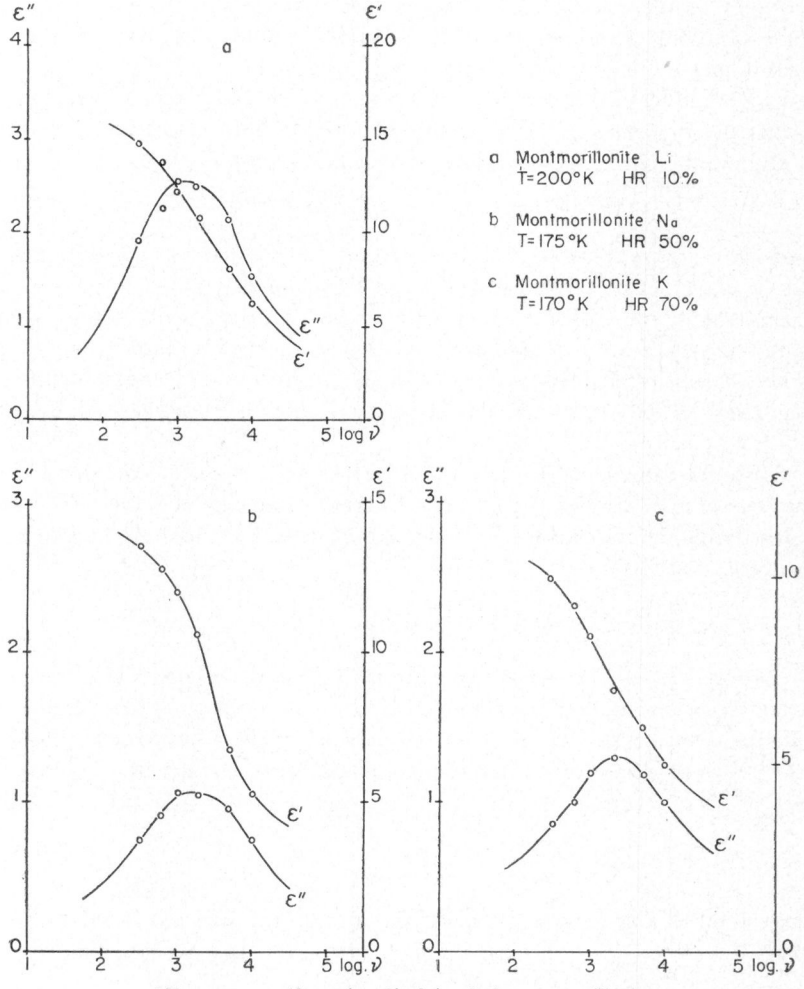


FIG. 20. — *Absorption dipolaire de la montmorillonite*

tions traduisent en effet un comportement idéal, mettant en jeu un temps de relaxation τ bien déterminé, identique pour tous les dipôles. En réalité, les temps de relaxation des dipôles ne sont pas identiques, mais sont distribués autour d'une valeur moyenne.

La figure 20 représente pour les montmorillonites Li, Na et K les fonctions $\varepsilon' = f(\log \nu)$ et $\varepsilon'' = f(\log \nu)$ aux humidités relatives donnant l'absorption dipolaire la plus intense. On voit que l'allure de ces courbes est conforme à des équations du type (35) et (36).

La montmorillonite Cs donne lieu à une absorption très faible, qu'il n'est pas possible d'analyser avec une précision suffisante pour en obtenir des résultats significatifs.

Les temps de relaxation déduits de la formule (37) sont fonction de la température, de la teneur en eau, et de la nature du cation compensateur. Ils décroissent à mesure que la température et la teneur en eau croissent.

A une température et un état d'hydratation donnés, les temps de relaxation se classent dans l'ordre $\tau_K < \tau_{Na} < \tau_{Li}$

La valeur moyenne des temps de relaxation observés pour l'absorption à basse température des systèmes montmorillonite-eau est de $5 \cdot 10^{-5}$ secondes.

En éliminant τ entre les équations (35) et (36) on trouve :

$$\varepsilon''^2 + \varepsilon'^2 - \varepsilon'(\varepsilon_s + \varepsilon_\infty) + \varepsilon_s\varepsilon_\infty = 0 \tag{38}$$

L'équation (38) représente un cercle en axes rectangulaires ε', ε'' (K. S. Cole et R. H. Cole, 1941), et ce cercle est centré sur l'axe des ε'.

Pratiquement, on obtient des arcs de cercles dont les centres sont situés au-dessous de l'axe des ε', et l'éloignement des centres des cercles par rapport à cet axe est lié à la distribution des temps de relaxation autour d'une valeur moyenne (K. W. Wagner, 1913 ; K. S. Cole et R. H. Cole, 1941 ; R. M. Fuoss et J. G. Kirkwood, 1941).

La figure 21 représente les diagrammes de Cole et Cole correspondant à la figure 20. Les arcs de cercles ont leur centre très au-dessous de l'axe des ε', la distribution des temps de relaxation est donc importante (la valeur de l'angle α est un indice de cette distribution).

2° *Énergie d'activation de l'absorption dipolaire.*

L'équation (34) due à Debye est établie à partir de l'expression de la polarisation électrique du milieu. Le temps de relaxation τ, qui intervient dans l'équation (34), est différent du temps de relaxation τ^* défini à partir de la polarisation moléculaire (τ^* est le temps de relaxation intrinsèque). Il existe cependant une relation simple entre τ et τ^* :

$$\tau = \tau^* \frac{\varepsilon_s + 2}{\varepsilon_\infty + 2} \tag{39}$$

Debye relie τ^* aux caractéristiques physiques du milieu par la relation :

$$\tau^* = \frac{4\pi\eta a^3}{k\,T} \tag{40}$$

a : rayon de la particule supposée sphérique.

η : viscosité du milieu.

Cette approximation est toutefois insuffisante, car on constate expérimentalement que τ^* est une fonction exponentielle de la température.

H. Eyring (1936) par analogie avec les cinétiques de réactions chimiques, introduit un facteur exponentiel dans l'expression de τ^* :

$$\tau^* = \frac{h}{k\,T} \exp. \frac{\Delta F^*}{R\,T} \tag{41}$$

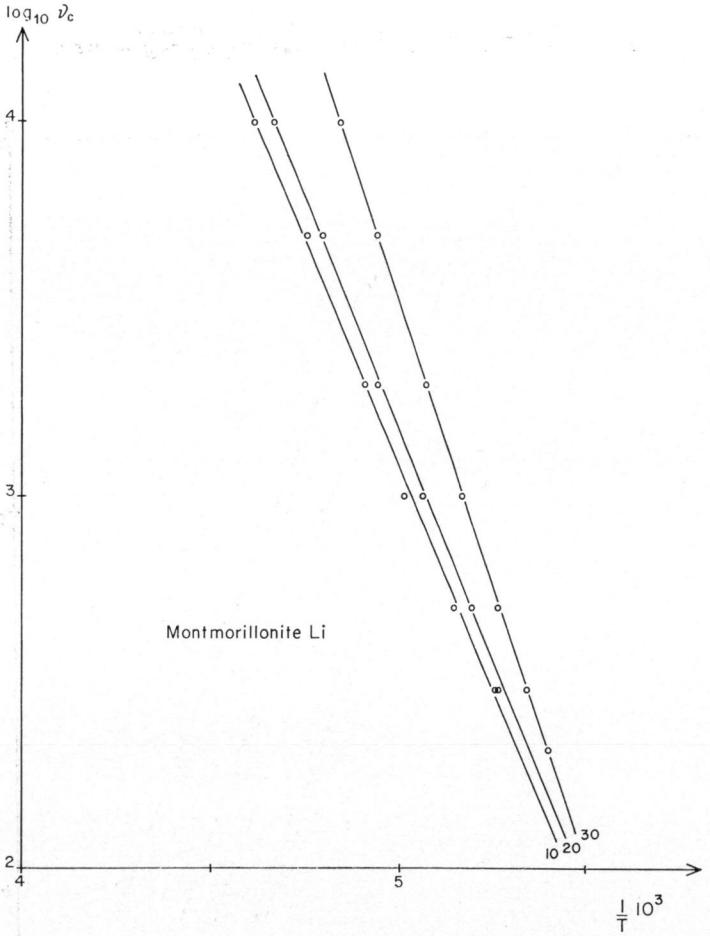


FIG. 22. — *Fonction* $\log \nu_c = f(1/T)$ *pour l'absorption dipolaire de la montmorillonite Li, à diverses humidités relatives*

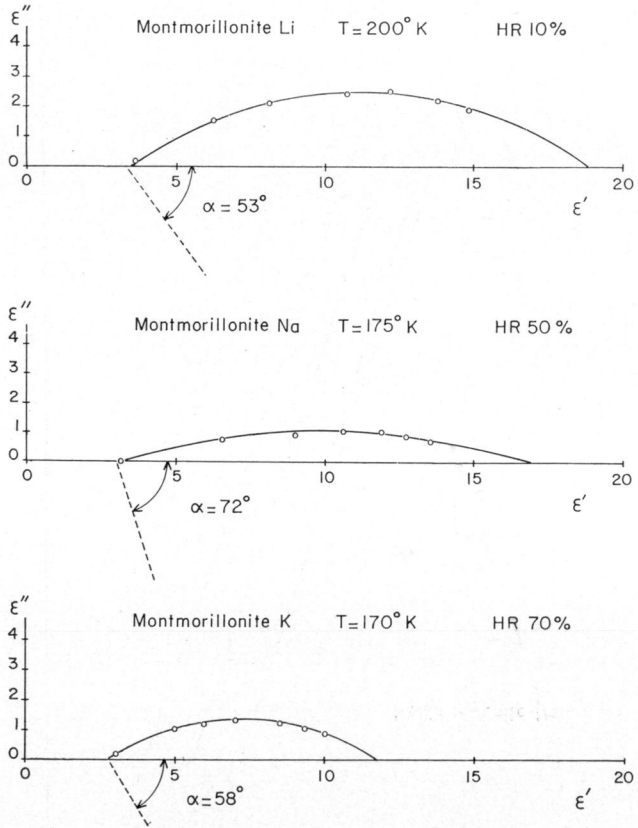


FIG. 21. — *Représentation de* COLE *et* COLE *de l'absorption dipolaire de la montmorillonite*

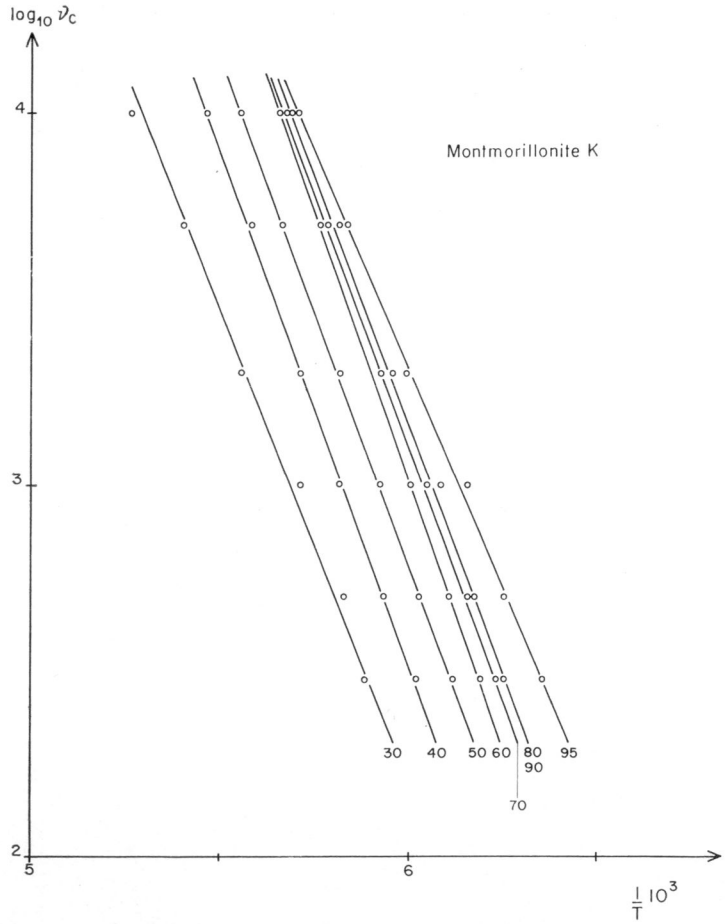


FIG. 24. — *Fonction* log ν_c = f(1/*T*) *pour l'absorption dipolaire de la montmorillonite K, à diverses humidités relatives*

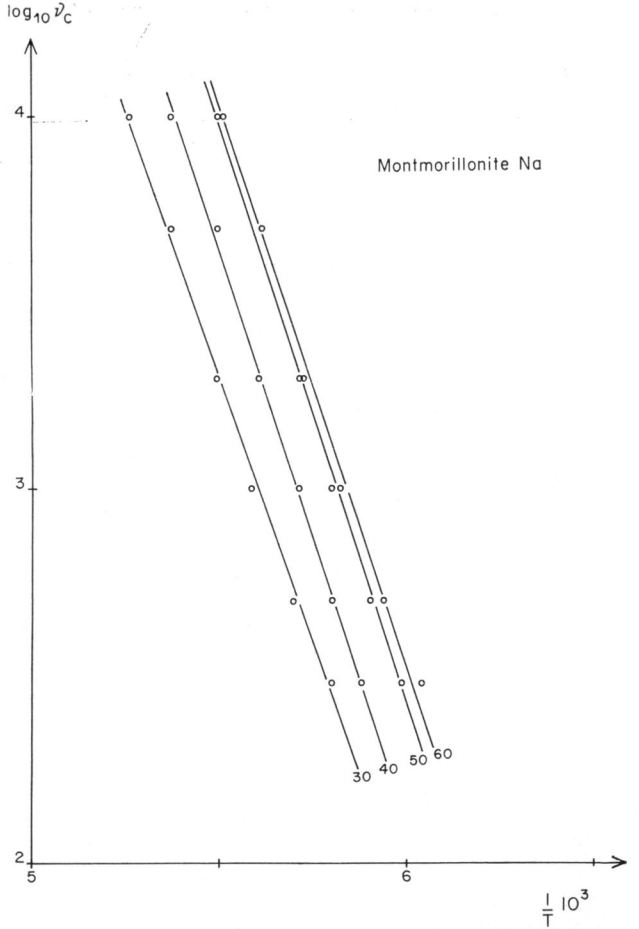


FIG. 23. — *Fonction* log ν_c = f(1/*T*) *pour l'absorption dipolaire de la montmorillonite Na, à diverses humidités relatives*

ou ΔF^* est l'énergie libre d'activation de la relaxation dipolaire.

Des expressions (39) et (41), on obtient :

$$\tau = \frac{\varepsilon_s + 2}{\varepsilon_\infty + 2} \frac{h}{k\,T} \exp. \frac{\Delta F^*}{R\,T} \tag{42}$$

comme $$\tau = \frac{1}{\omega_m} = \frac{1}{2\pi\nu_c}$$

$$\nu_c = \frac{1}{2\,\pi} \frac{\varepsilon_\infty + 2}{\varepsilon_s + 2} \frac{k\,T}{h} \exp.- \frac{\Delta F^*}{R\,T} \tag{43}$$

de la forme : $$\nu_c = A \exp. - \frac{\Delta F^*}{R\,T}$$

Par suite, la fonction $\log \nu_c = f(1/T)$ doit être une droite dont la pente est directement proportionnelle à l'énergie d'activation du phénomène de relaxation dipolaire.

TABLEAU 6

Énergies d'activation en kcal·mole^{-1}

Teneur en eau %	2	4	6	8	10	12	14	16	18
Montmorillonite Li	10,2	11	12,5						
Montmorillonite Na ...	12,5	14,1	14,6	14,3	13				
Montmorillonite K		12,6	13,4	13,3	12,8	12,5	12,1	11,8	11,4

Les fonctions $\log \nu_c = f(1/T)$, tracées pour les montmorillonites Li, Na et K à différentes teneurs en eau, sont effectivement des droites (fig. 22 à 24).

Les énergies d'activation déterminées à l'aide de ces droites sont groupées dans le tableau 6, elles sont de l'ordre de grandeur de l'énergie d'activation de l'absorption dipolaire de la glace : 12,5 kcal·mole^{-1} (0,55 *e*V).

CHAPITRE III

HYPOTHÈSES D'INTERPRÉTATION DES PROPRIÉTÉS DIÉLECTRIQUES DE LA MONTMORILLONITE

On envisagera successivement les phénomènes de pertes par conductivité et les phénomènes de pertes par absorption dipolaire.

1. Les phénomènes de pertes par conductivité

Rappelons que nous avons mis en évidence :

— Pour les teneurs en eau inférieures à 8 p. 100, deux domaines de conductivité couvrant la totalité de l'intervalle de températures exploré.

— Pour les teneurs en eau supérieures à 8 p. 100, trois domaines de conductivité comprenant les deux précédents au-dessous de 273°K, et le troisième à partir de 273°K.

Les deux premiers domaines n'apparaissent jamais indépendamment l'un de l'autre, ils seront donc étudiés simultanément.

A. — Conductivités aux basses et moyennes températures

Nous avons montré, au cours du précédent chapitre, que les domaines de conductivité aux basses et moyennes températures correspondent à deux processus d'énergies différentes, mettant en jeu des déplacements de charges libres (équation 22). La température assure la prédominance de l'une ou l'autre de ces conductivités.

Trois explications peuvent, *a priori*, rendre compte de l'existence de ces deux processus :

— deux mécanismes différents mettent en jeu le même porteur de charge;

— un même mécanisme met en jeu deux porteurs de charges différents;

— deux mécanismes mettent en jeu deux porteurs de charges différents.

Quelle que soit la réalité, le comportement diélectrique de la montmorillonite présente des analogies avec celui des cristaux ioniques, pour lesquels la conductivité est essentiellement due à des défauts de réseau (Mott et Gurney, 1940). Cette analogie est utilisée comme point de départ (J. Mamy, J. Chaussidon, 1966).

a) *Conductivité extrinsèque et conductivité intrinsèque*

A la suite des résultats expérimentaux exposés plus haut, et en s'appuyant sur les remarques précédentes, les deux types de conductivité mis en évidence peuvent être décrits par les hypothèses explicatives suivantes :

— A basse température (130°K à 200°K), le deuxième terme de l'équation (33) est négligeable devant le premier. La conductivité est donc essentiellement due au mécanisme de plus faible énergie Q_1. Ce mécanisme consiste dans la migration de défauts de réseau préexistants dans le milieu en nombre limité (cf. équation 31). Il n'y a donc pas à fournir d'énergie de création de défauts de réseau. L'énergie Q_1 représente seulement la hauteur de la barrière de potentiel de transfert. Elle est égale à l'énergie de migration des porteurs de charges.

— A mesure que la température croît, des effets thermiques peuvent provoquer un certain désordre de la structure, ou permettre de nouveaux transferts de charges. Si la conductivité est due à un désordre de structure, par exemple l'arrachement d'une particule à sa position d'équilibre, il faut apporter une énergie de création du porteur de charge (cf. équation 31). L'énergie totale Q_2 nécessitée par la conductivité est alors la somme d'une énergie de création et d'une énergie de migration des porteurs de charges. Q_2 peut donc être sensiblement supérieur à Q_1 et doit être en relation avec le degré d'ordre du milieu.

— Cette distinction entre les deux domaines de conductivité revient à définir le premier comme un domaine de conductivité « extrinsèque », et le second comme un domaine de conductivité « intrinsèque. Il reste cependant à préciser la nature exacte des mécanismes mis en cause.

b) *Mécanismes de la conductivité*

Certains chercheurs (M. M. MORTLAND et *al.*, 1963 ; R. CALVET et *al.*, 1964) ont observé une forte ionisation de l'eau adsorbée à la surface des particules de montmo rillonite (ionisation d'autant plus forte que la quantité d'eau fixée est plus faible) et d'autres (P. DUCROS, M. DUPONT, 1964) ont montré que les protons de l'eau interfeuillets sont susceptibles de sauter d'une molécule d'eau à l'autre (même à très basse température). Il paraît donc légitime d'examiner les phénomènes de conductivité de la montmorillonite sous l'angle des mécanismes de transfert de protons.

Les mécanismes de conductivité par transfert de protons ont été étudiés exclusivement dans les cas de l'eau et de la glace (J. B. HASTED, 1961). Les conductivités de la glace et de l'eau sont dues à des transferts de protons d'une molécule d'eau à l'autre, selon deux mécanismes différents.

En ce qui concerne la glace, ces mécanismes mettent en jeu deux types de défauts de réseau, selon des modalités que nous rappelons brièvement (N. BJERRUM, 1962 ; GRANICHER et *al.*, 1957 ; M. EIGEN et L. de MAEYER, 1958 ; C. JACCARD, 1965) :

1° *Mécanisme orientationnel.*

Le mécanisme orientationnel proposé par BJERRUM met en jeu une distribution irrégulière des protons sur les liaisons hydrogène entre molécules d'eau. Certaines liaisons sont doublement occupées (défaut D), d'autres sont inoccupées (défaut L)

(fig. 25). De tels défauts de structure sont évidemment instables, et peuvent être transférés de liaison à liaison par de simples rotations des molécules d'eau autour de leurs liaisons hydrogène normales. Par suite, un proton peut se déplacer à travers le réseau et jouer le rôle du porteur de charge dans la conductivité (voir par exemple le trajet décrit par les flèches courbes sur la figure 25).

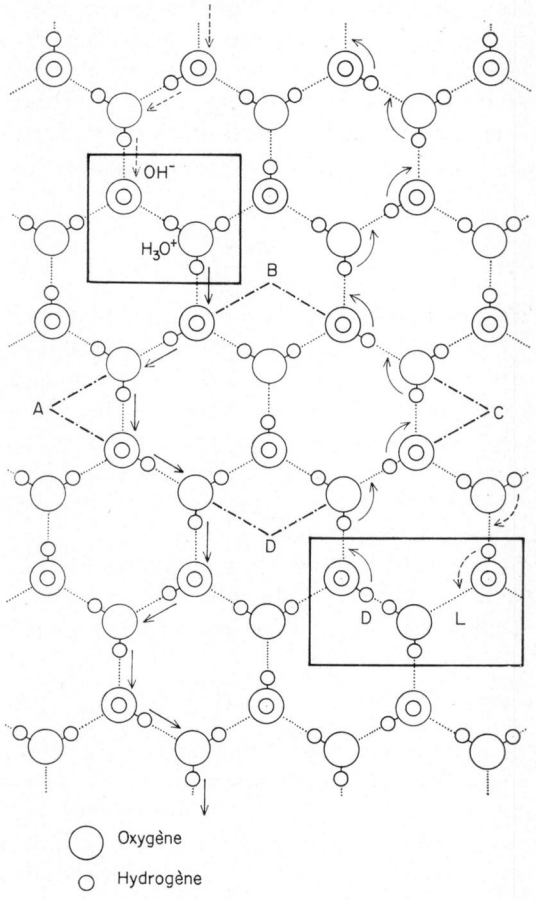


FIG. 25. — *Défauts de réseau de la glace*
ABCD : limites de la maille de la glace hexagonale

L'énergie d'activation de rotation d'une molécule d'eau dans un champ électrique alternatif a été déterminée par de nombreux chercheurs, mais les chiffres varient entre 9 et 24 kcal·mole^{-1}. BJERRUM estime que l'énergie mise en jeu dans la création et le déplacement d'un défaut orientationnel est de l'ordre de 14,4 ± 1,7 kcal·mole^{-1} (énergie de formation : 11,9 ± 1,7 kcal·mole^{-1} ; énergie de rotation : 2,5 kcal·mole^{-1}).

2° *Mécanisme translationnel.*

La glace peut présenter des défauts structuraux du type ion hydronium H_3O^+, correspondant à la présence d'un proton en excès sur une molécule d'eau, et du type

ion hydroxyle OH^-, correspondant à la perte d'un proton par une molécule d'eau (fig. 25). Ces défauts sont susceptibles de se déplacer par translation d'un proton le long d'une liaison hydrogène (flèches droites de la figure 25). Un tel transfert de proton équivaut, statistiquement, à une migration des ions H_3O^+ et OH^- à travers le milieu, mais il ne met réellement en cause que des déplacements de protons.

La mobilité des protons est 10 à 100 fois plus élevée dans un transfert H_3O^+ que dans un transfert du type OH^-. L'énergie d'activation du mécanisme H_3O^+, qui correspond au déplacement d'un proton entre deux sites non chargés, est plus faible que celle nécessaire au mécanisme OH^-, pour lequel le proton doit franchir la barrière de potentiel séparant deux charges résiduelles négatives. (B. E. CONWAY et *al.*, 1956 ; P. GOSAR, 1963). Cette énergie d'activation est, dans les deux cas, inférieure à 5 kcal·mole^{-1}.

3° *Rôle des impuretés.*

L'adjonction d'une impureté à la glace peut faire apparaître préférentiellement l'un des mécanismes évoqués. HF, par exemple, en se substituant à une molécule d'eau, entraîne la perte d'un proton sur une liaison hydrogène et favorise un mécanisme orientationnel du type L, mais il peut aussi, à l'état ionisé, provoquer l'augmentation de la concentration en H_3O^+ de la glace, il se comporte alors comme un donneur de protons (GRANICHER et *al.*, 1957). De même LiOH en s'ionisant provoque une augmentation de la concentration en ions OH^-, il se comporte comme un accepteur de protons (M. EIGEN, L. de MAEYER, 1958).

On peut donc, par un choix convenable d'impuretés (ce qui revient à doper la glace) faire apparaître des conductivités du type H_3O^+ ou OH^-. Le procédé est tout à fait comparable à celui qui est utilisé pour la production des semiconducteurs *n* et *p*.

4° *Conductivité de la glace.*

Les différents mécanismes envisagés précédemment peuvent intervenir simultanément, ou séparément, dans la conductivité de la glace. La nature des impuretés et la température peuvent toutefois assurer la prédominance de l'un d'entre eux.

A 263°K, la concentration en défauts ioniques est estimée à $8 \cdot 10^{10} \cdot cm^{-3}$, et celle des défauts orientationnels à $7 \cdot 10^{15} \cdot cm^{-3}$. Les défauts ioniques sont donc les porteurs minoritaires, mais leur mobilité ($8 \cdot 10^{-6} m^2/Vs$) est environ 400 fois supérieure à celle des défauts orientationnels ($2 \cdot 10^{-8} m^2/Vs$) et l'énergie d'activation nécessaire à leur formation et à leur transfert (5 kcal·mole^{-1} environ) est sensiblement inférieure à l'énergie requise par la formation et le transfert d'un défaut orientationnel (15 kcal·mole^{-1} environ). Il en résulte que l'abaissement de la température doit favoriser la conductivité ionique, qui est le processus de moindre énergie. Une structure « gelée » est d'ailleurs moins favorable à des rotations moléculaires qu'à des translations de protons le long des liaisons hydrogène.

Les mécanismes translationnels et orientationnels peuvent intervenir dans la glace sans que la présence d'une impureté soit nécessaire. Ils correspondent alors simplement à un certain désordre de la structure, et dans ce cas la conductivité est du type « intrinsèque ». Si, par contre, le mécanisme résulte de l'introduction d'une impureté, la conductivité est du type « extrinsèque ».

c) *Application au cas de l'eau adsorbée par la montmorillonite*

L'eau adsorbée par la montmorillonite se répartit en couches successives. Chacune de ces couches, ou l'ensemble que forment plusieurs couches, doit résulter d'une organisation des molécules d'eau avec un certain degré d'ordre. Il nous paraît par conséquent raisonnable de tenter d'expliquer les propriétés conductrices de l'eau adsorbée, à l'aide des « mécanismes modèles » mis en jeu dans la glace.

1° *Conductivité à basse température* (130°K à 200°K).

Dans le domaine de conductivité aux basses températures, l'énergie d'activation est voisine de 3,5 kcal·mole^{-1}. Cette énergie est sensiblement la même pour les quatre échantillons de montmorillonite, et demeure pratiquement constante, quelle que soit la teneur en eau (fig. 17). Cette valeur relativement faible ne correspond vraisemblablement qu'à l'énergie de migration du porteur de charge. C'est en effet l'ordre de grandeur de l'énergie de migration (par translation ou rotation) des défauts de la glace :

— Énergie de rotation d'un défaut orientationnel du type L : 2,2 kcal·mole^{-1}.
— Énergie de translation du type OH^- : 4,3 kcal·mole^{-1}.
— Énergie de translation du type H_3O^+ : 3,8 kcal·mole^{-1}. (0,5 par effet tunnel).

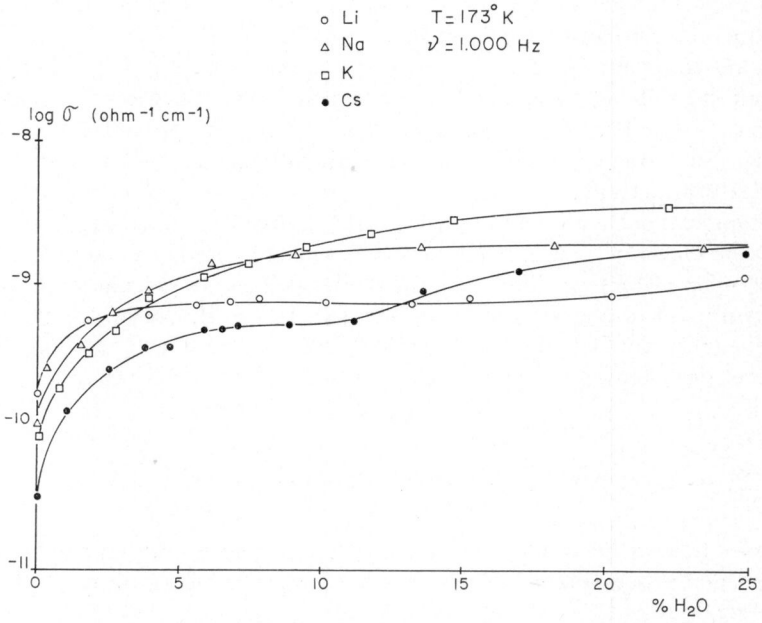


FIG. 26. — *Conductivité de la montmorillonite à basse température, en fonction de la teneur en eau*

A priori, il est possible d'admettre l'existence simultanée de ces divers mécanismes, mais la nature du milieu peut favoriser l'un d'entre eux.

Les couches d'eau adsorbées sont organisées autour de sites présentant des

charges résiduelles positives (Li^+, Na^+, K^+, Cs^+). La présence de ces charges positive peut provoquer l'ionisation des molécules d'eau, selon le schéma :

$$M^+ + H_2O \rightarrow MOH + H^+$$

Le proton libéré peut déclencher un mécanisme de transfert du type H_3O^+.

La valeur de l'énergie d'activation et la constance de cette valeur, quelle que soit la teneur en eau, sont en accord avec un mécanisme de transfert de protons.

Le nombre de charges résiduelles responsables des défauts protoniques est constant, on doit donc s'attendre à ce que la conductivité atteigne assez rapidement une valeur limite lorsque la teneur en eau croît. C'est bien ce que l'on observe expérimentalement (fig. 26).

2° *Conductivité à moyenne température* (200°K à 273°K).

L'élévation de la température produit une augmentation de l'énergie thermique moyenne des molécules d'eau. L'accroissement de la teneur en eau augmente les distances interfeuillets. Ces deux effets conjugués accroissent nécessairement la mobilité des molécules d'eau adsorbées. Dans ces conditions, la concentration des défauts orientationnels peut devenir très supérieure à celle des défauts ioniques.

Lorsque la teneur en eau croît, les chances d'apparition des défauts orientationnels augmentent, ce qui entraîne une extension vers les basses températures du domaine de conductivité correspondant (ex. fig. 10 à 14). D'autre part, l'accroissement très important de la conductivité avec l'hydratation (fig. 9) trahit le caractère « intrinsèque » des mécanismes mis en jeu.

Tant que la teneur en eau ne dépasse pas environ 8 p. 100, le présent domaine de conductivité s'étend jusqu'aux températures les plus élevées atteintes dans les expériences ($\sim$ 330°K). Le passage par 273°K, qui ne fait apparaître aucune singularité, n'apporte donc pas dans ce cas de modifications structurales susceptibles de perturber la conductivité.

Les énergies d'activation mises en jeu sont comprises entre 10 et 14,5 kcal·mole^{-1} (fig. 17) ; elles croissent avec la teneur en eau et varient avec la nature du cation compensateur, mais restent de l'ordre de grandeur des énergies calculées par BJERRUM pour la création et la migration d'un défaut orientationnel. Les variations observées avec la teneur en eau et la nature du cation peuvent être dues à des modifications des barrières de potentiel en fonction des effets stériques et des interactions cation-eau.

B. — CONDUCTIVITÉ A HAUTE TEMPÉRATURE (T > 273°K)

Pour les teneurs en eau supérieures à 8 p. 100, une cassure apparaît à 273°K, suivie d'un nouveau domaine linéaire dans la représentation $\log \varepsilon'' = f(1/T)$ (fig. 10 à 14).

Les énergies d'activation de ce domaine de conductivité sont inférieures à celles du domaine des moyennes températures, et décroissent sensiblement à mesure que la teneur en eau croît (fig. 18). Elles se classent dans l'ordre des pouvoirs polarisants des cations (fig. 27), sauf pour le Cs. L'ordre $Q_{Li} > Q_{Na} > Q_K$ est bien celui que l'on peut attendre, si l'énergie mise en jeu est le reflet de l'énergie de liaison des cations

aux molécules d'eau d'hydratation. Le césium peut être classé à part en raison de son volume, et compte tenu du fait que l'espacement interfeuillets de la montmorillonite Cs ne dépasse pas celui d'une couche d'eau.

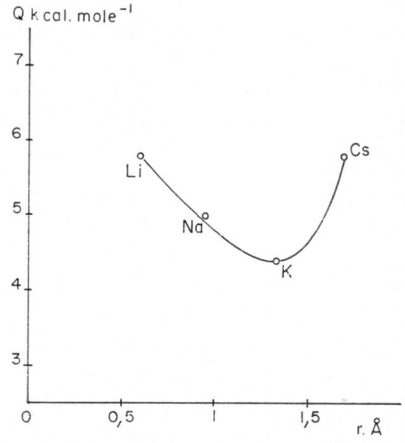


FIG. 27. — *Énergie d'activation de la conductivité pour T > 273°K et une teneur en eau de 20 p. 100 en fonction des rayons ioniques des cations*

Ces énergies d'activation, qui varient entre 8 et 4 kcal·mole^{-1} lorsque la teneur en eau croît, correspondent aux énergies d'activation de migration des cations compensateurs dans le film d'eau adsorbée (J. D. OSTER, P. F. LOW, 1963 ; R. CALVET, 1966).

Au-dessus de 273°K, et pour des teneurs en eau suffisantes, les cations peuvent donc intervenir plus directement dans la conductivité, soit comme porteurs de charges eux-mêmes, soit dans le type de liaison qu'ils imposent aux molécules d'eau. Ces dernières peuvent être alors dans un état voisin de celui de l'eau liquide, comme le suggère le saut de conductivité qui apparaît au voisinage de 273°K pour les plus fortes hydratations (environ 20 p. 100 d'eau). Ce saut de conductivité traduit en effet un véritable changement de phase de l'eau adsorbée.

2. Effet Maxwell-Wagner

C'est essentiellement la représentation tg $\delta = f(T)$ qui est utilisée pour dégager les principaux caractères de cette absorption.

La fréquence du champ électrique et la teneur en eau, donc la valeur de la conductivité (fig. 15), ont une influence déterminante sur l'intensité de l'absorption. Celle-ci existe cependant, quelle que soit la teneur en eau, pour les quatre échantillons de montmorillonite. Les courbes représentant les angles de perte maxima tg δ_m en fonction de la teneur en eau (fig. 28) passent par une valeur maximum à une teneur en eau qui est sensiblement la même pour les quatre échantillons (environ 18 p. 100 d'eau). On peut aussi remarquer une assez grande similitude entre les quatre courbes, tout se passe en effet comme si l'évolution du phénomène était essentiellement conditionnée par la variation de composition du milieu.

On peut donc considérer que l'absorption à moyenne température est bien due à un effet du type Maxwell-Wagner. Par suite, la teneur en eau de 18 p. 100 doit correspondre à un effet d'hétérogénéité particulièrement marqué, ce qui n'est pas en désaccord avec le fait que la montmorillonite se trouve alors dans la zone de passage entre l'état une couche et l'état deux couches dans les espaces interfeuillets.

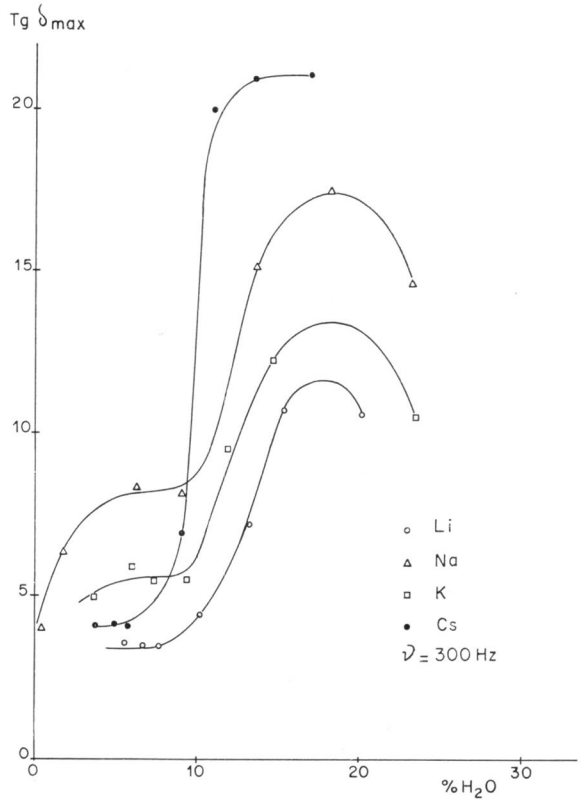


FIG. 28. — *Variation en fonction de la teneur en eau, du facteur de dissipation maximum de l'absorption à moyenne température*

3. Les phénomènes de pertes par absorption dipolaire

L'absorption à basse température, qui réunit tous les caractères d'une absorption dipolaire, et dont l'énergie d'activation est sensiblement égale à l'énergie de relaxation des molécules d'eau dans la glace, peut être attribuée à la rotation des dipôles formés par les molécules d'eau.

Le mécanisme de cette rotation doit cependant être différent de celui qui intervient dans la conductivité du type orientationnel, puisque le phénomène apparaît dans un autre intervalle de températures, et dans un domaine d'hydratation plus limité.

Les figures 22 à 24, qui nous ont permis de déterminer l'énergie d'activation de l'absorption, suggèrent certaines remarques.

1° L'absorption dipolaire ne se manifeste pas aux mêmes températures pour les trois échantillons de montmorillonite. La montmorillonite Li absorbe à une température sensiblement plus élevée (environ 200°K) que les montmorillonites Na et K (environ 170°K).

2° Les temps de relaxation dipolaire diminuent à mesure que la teneur en eau croît, ce qui traduit un affaiblissement progressif des contraintes auxquelles sont soumis les dipôles.

3° *L'absorption à basse température n'est observable que dans des domaines limités d'hydratation.* C'est un fait dont la signification nécessite quelques développements.

En portant graphiquement, en fonction de la teneur en eau, la valeur maximum ε''_m du facteur de perte de l'absorption dipolaire des échantillons de montmorillonite, on obtient des courbes représentant, en fonction des teneurs en eau, les variations des pertes maxima par effets dipolaires (à une fréquence donnée).

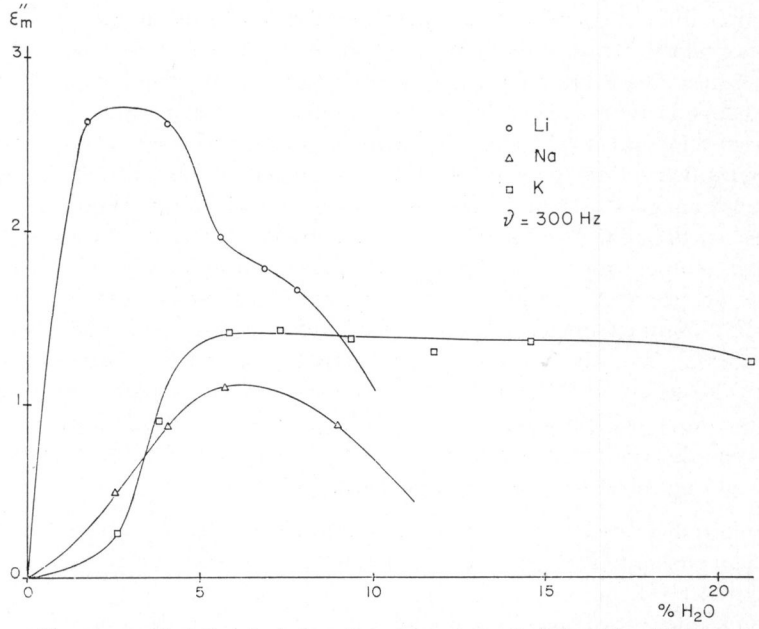


FIG. 29. — *Variation du facteur de perte maximum de l'absorption dipolaire, en fonction de la teneur en eau*

Les courbes de la figure 29 délimitent ainsi les domaines d'hydratation où l'absorption dipolaire se manifeste. Mais on voit de plus que l'intensité de l'absorption varie avec la nature du cation compensateur et la teneur en eau. Les différences de comportement des trois systèmes cation-argile sont particulièrement apparentes sur cette représentation graphique, et il est possible d'en tirer une conclusion importante :

Les processus d'hydratation de la montmorillonite varient avec la nature du cation échangeable, mais il existe, dans un domaine déterminé d'hydratation, une structure de l'eau interfeuillets favorable à l'apparition d'une absorption dipolaire. L'intensité de cette absorption est liée à la structure de l'eau adsorbée, et son domaine d'existence est délimité par le mode d'hydratation du minéral.

4. Conclusion de la deuxième partie

L'exposé des propriétés diélectriques de la montmorillonite, et la tentative d'interprétation qui en a été donnée, ont permis de préciser un certain nombre de faits en ce qui concerne les propriétés de l'eau adsorbée, nous en rappelons les points essentiels.

Les caractéristiques diélectriques du système montmorillonite-eau sont dominées par la nature et les propriétés du film d'eau adsorbée.

1° La conductivité en courant alternatif de basse fréquence est assurée par des charges libres existant au sein des couches d'hydratation.

Le transfert des charges libres responsables de la conductivité se fait suivant des modalités différentes selon la température et selon la teneur en eau du milieu.

— Aux températures inférieures à 273°K, et pour toutes les teneurs en eau, la conductivité est due à une migration de protons mettant en jeu deux mécanismes différents, dont la température définit les importances relatives.

— Aux températures inférieures à 200°K, la conductivité peut être attribuée à des transferts de protons le long des liaisons hydrogène du réseau de l'eau. Ces « défauts translationnels » sont favorisés par la présence des charges résiduelles positives des cations. Ce domaine de conductivité a par suite été défini comme « extrinsèque ».

— Aux températures supérieures à 200°K, la conductivité peut être attribuée à un mécanisme de transfert de protons par des rotations limitées des molécules d'eau. Ces « défauts orientationnels » résultent de désordres apparaissant dans le réseau de l'eau par suite d'effets thermiques. La conductivité est du type « intrinsèque ».

— Au-dessus de 273°K, et pour des teneurs en eau supérieures à celles qui assurent la formation d'une seule couche d'eau dans les espaces interfeuillets, un nouveau type de conductivité apparaît, dans lequel pourrait intervenir en plus un processus de migration des ions échangeables.

2° A côté des processus de migration ionique que décèle l'existence de divers mécanismes de conductivité, nous avons pu mettre en évidence une absorption dipolaire du type Debye.

Les molécules d'eau adsorbées donnent lieu à une absorption par rotation moléculaire associée à des défauts de réseau dans le domaine des ondes kilométriques, à des températures comprises entre 170°K et 200°K. Le domaine d'existence et l'intensité de cette absorption sont fortement influencés par la nature du cation compensateur, et par le mode d'hydratation des surfaces.

La confrontation de ces résultats avec les renseignements obtenus dans la première partie de ce travail fait l'objet des prochains chapitres, elle permettra d'étudier les aspects structuraux de l'adsorption de l'eau par la montmorillonite.

RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 27, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles séparées seront utilisées pour les références bibliographiques, les tableaux, les légendes des figures et graphiques.

Au début de chaque mémoire, on indiquera : — *le titre du mémoire* : il ne devra pas comporter d'abréviation ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs*, précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de... ; — *le nom de l'établissement*, dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

Les mémoires seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :

a) *sommaire* : résumé suffisament précis pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction* dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé*, en donnant sous une forme concise, tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats* à présenter de la manière la plus brève possible ; e) *discussion et conclusion*; f) *résumé* destiné à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ;g) *remerciements* pour les collaborations, les fonds, les dons... ; h) *Références bibliographiques*.

Les travaux originaux en anglais doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français très *complet* placé en tête de l'article. Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

Pour les autres documents (notes, mises au point, revues, rapports, etc.) l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

Les références bibliographiques doivent être citées dans le texte de la manière suivante : DUPONT et DUVAL, 1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de et *al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

Pour les articles : le (s) nom (s) de (s) auteur (s) suivi (s) des initiales du (des) prénom (s) ; la date de parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatres langues mentionnées) : le titre du périodique en abrégé, selon la *World List of Scientific Periodicals*, ou le *Bulletin signalétique du C. N. R. S.* ; le volume ; la première et la dernière page de l'article.

Pour les ouvrages : le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés, et, si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera en plus le nom de l'auteur du chapitre cité, le nom des rédacteurs principaux, précédé de la mention « in », le titre de l'ouvrage.

La mention de « communication personnelle » ou « données non publiées » etc. doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d' « Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies, doivent être fournis à part. Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérotations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponibles est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit.

Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur feuille séparée, et porter les numéros des figures.

Les graphiques, schémas, cartes, dessins d'appareils seront envoyés *à l'état de projets*, leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5, *soit* × 0,25.

Il est rappelé que le format utile des Annales est : 16 × 24 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

Photographies : Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos 9 × 12, 4 photos 9 × 5,5, 6 photos 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible après clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur feuilles séparées et porter les numéros des figures.

Correction des épreuves : les auteurs recevront deux épreuves à corriger. Les corrections « d'auteur » ne sont autorisées que sur le premier jeu d'épreuves.

Envoi du manuscrit : M. HÉNIN, Centre national de Recherches agronomiques, 78 - Versailles, France. On demande deux exemplaires.

Le Directeur de la publication : M. L. CAGNAC

Imprimerie Bussière à Saint-Amand (Cher), France. — 7-1968.

Dépôt légal : 3e trimestre 1968. N° d'impression : 2232.

ANNALES
AGRONOMIQUES

VOLUME 19 1968 NUMÉRO 3

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE
149 rue de Grenelle, PARIS-7e

Reproduction, même partielle, interdite sans autorisation des auteurs et de l'Institut national de la Recherche agronomique, à l'exception des sommaires et résumés

Ann. agron., 1968, **19** (3), 251-292.

RECHERCHES SUR L'HYDRATATION DE LA MONTMORILLONITE : PROPRIÉTÉS DIÉLECTRIQUES ET STRUCTURE DU FILM D'EAU (1)

TROISIÈME PARTIE (2)

J. MAMY

Station centrale d'Agronomie,
Centre national de Recherches agronomiques, 78 - Versailles
Institut national de la Recherche agronomique

---

(1) Thèse de Doctorat ès Sciences physiques soutenue le 12 janvier 1968 à la Faculté de Sciences de l'Université de Paris.

(2) Les première et deuxième parties ont été publiées dans le nº 2, 1968, des Annales agronomiques.

TROISIÈME PARTIE

DISCUSSION ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

CHAPITRE PREMIER

ÉTUDE SYNTHÉTIQUE DES RÉSULTATS DES DEUX PREMIÈRES PARTIES

1. Introduction

Les mécanismes proposés pour rendre compte des phénomènes d'absorption et de conductivité donnent un rôle prépondérant aux molécules d'eau et aux cations qui doivent être associés dans des structures qu'il nous reste à définir. Certains éléments de ces structures sont imposés d'une part, par des considérations stériques, et d'autre part, par l'accord nécessaire entre les résultats expérimentaux des deux premières parties.

L'absorption dipolaire semble, plus que les pertes par conductivité, liée à des états particuliers de l'eau adsorbée. Elle ne se manifeste en effet, pour les différents échantillons de montmorillonite, qu'à des teneurs en eau inférieures à deux couches interfeuillets, et elle présente une intensité maximum pour les hydratations correspondant au premier palier des courbes d'ouverture des espaces interfeuillets (comparer à ce sujet les figures 3 et 28).

L'absorption dipolaire des molécules d'eau adsorbées se manifeste pour les montmorillonites Li et Na dans des domaines d'hydratation plus réduits que pour la montmorillonite K ; or, on a déjà vu que le potassium favorise l'homogénéité et la stabilité de certains états d'hydratation.

Il faut donc rechercher, dans le domaine d'hydratation exploré, les limites d'existence et le « poids statistique » des différents états d'équilibre des systèmes montmorillonite-eau. C'est essentiellement l'étude détaillée des variations d'espacements interfeuillets au cours de l'adsorption d'eau par la montmorillonite qui peut nous apporter ces renseignements.

2. Stabilité des états d'hydratation de la montmorillonite

La variation des espacements interfeuillets au cours de l'hydratation est caractérisée par l'existence de deux paliers : le premier au voisinage de 11,7 Å, le second à 15,5 Å (fig. 30). Ces deux paliers correspondent nécessairement à des états relativement stables des systèmes argile-eau. Comme nous l'avons montré, le premier palier ne caractérise pas un milieu homogène, mais un mélange en proportions constantes d'espacements à 10 Å et à 12,4 Å (l'espacement à 10 Å correspondant à des feuillets

accolés, et l'espacement à 12,4 Å à des feuillets séparés par une seule couche d'eau, que nous appellerons désormais « monocouche »). Ce mélange forme donc un interstratifié double. La zone de passage de l'état monocouche à l'état deux couches correspond, par contre, à une interstratification triple.

Les diagrammes de BROWN et MAC EVAN (voir première partie, chap. II) sont applicables à des interstratifiés doubles et ne sont donc utilisables que dans les limites de formation du premier palier des courbes de la figure 3. Cependant l'ensemble du processus de gonflement de la montmorillonite peut être représenté assez simplement en utilisant un diagramme triangulaire bâti sur le modèle de ceux proposés par E. C. JONAS et T. E. BROWN (1959) pour l'identification des composants d'interstratifiés triples.

a) *Diagramme pour l'analyse des interstratifiés triples*

La figure 30 donne le schéma de principe du diagramme relatif à une interstratification triple 10 Å ; 12,4 Å ; 15,4 Å.

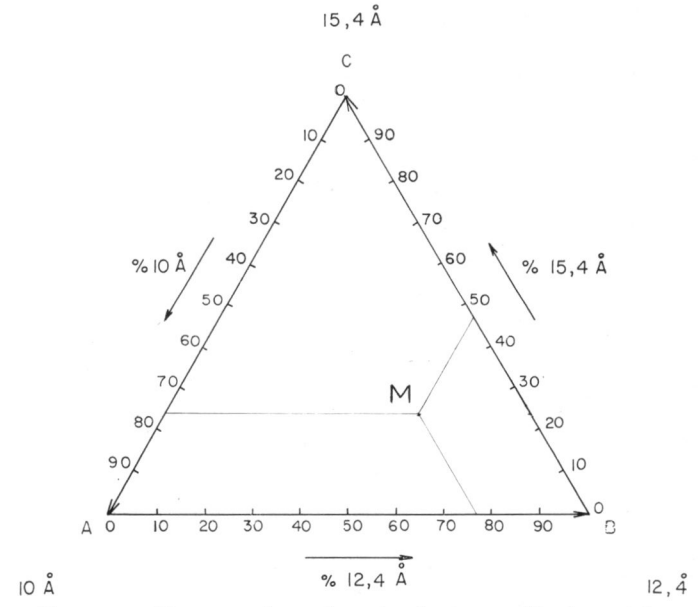


FIG. 30. — *Diagramme de représentation des interstratifications triples*

Tout point pris sur un côté du triangle équilatéral ABC représente un mélange binaire :

Sur AB : mélange 10 Å-12,4 Å correspondant aux espacements interfeuillets pour 0 et 1 couche d'eau,

Sur BC : mélange 12,4 Å-15,4 Å correspondant à 1 et 2 couches d'eau,

Sur CA : mélange 10 Å-15,4 Å correspondant à 0 et 2 couches d'eau.

Tout point M intérieur au triangle représente un mélange ternaire 10 Å ; 12,4 Å ; 15,4 Å. Si chaque côté constitue une échelle de pourcentage pour chacune des trois

phases, les coordonnées du point M par rapport aux trois axes donnent les proportions de chacune des phases du mélange. Ce diagramme permet par conséquent de représenter toutes les combinaisons possibles des trois phases.

A chaque complexe d'interstratification correspond un espacement apparent d_{001} donné des feuillets ; on peut donc préciser cet espacement pour tout point M du diagramme triangulaire.

La détermination de l'espacement apparent peut être faite soit par calcul, soit expérimentalement, si l'on dispose de mélanges de composition connue.

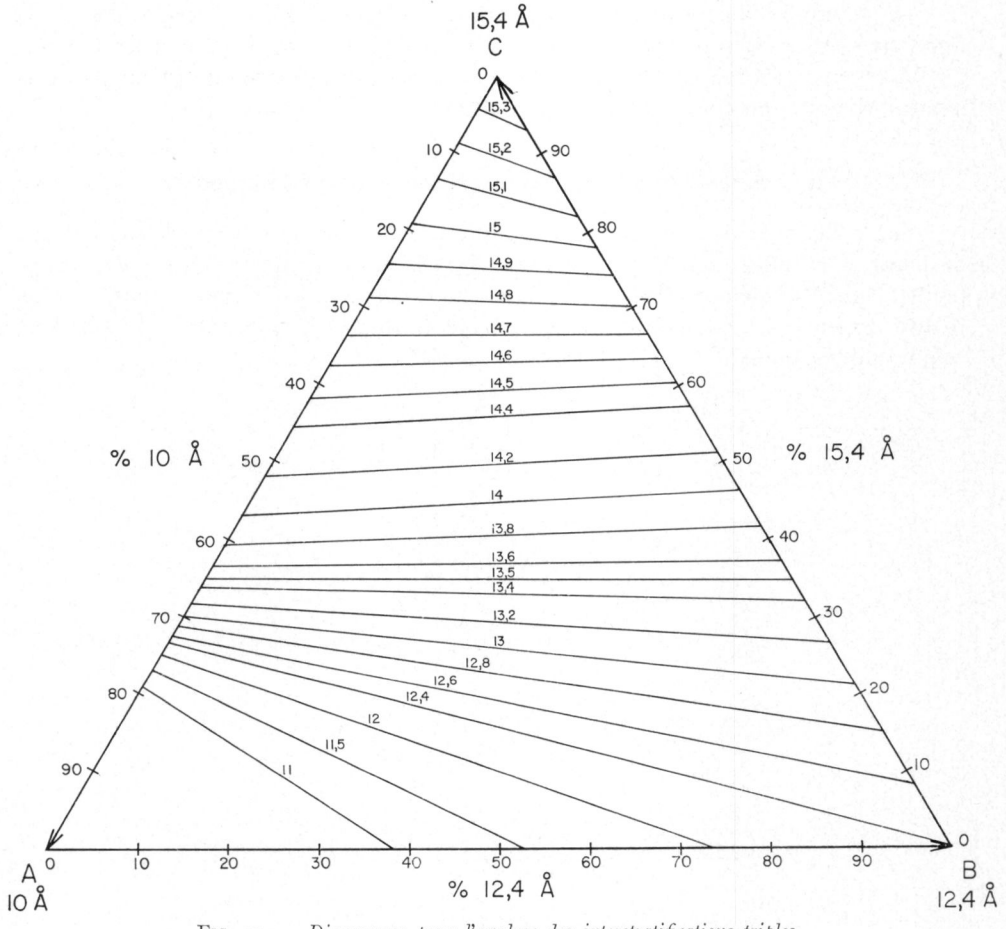


FIG. 31. — *Diagramme pour l'analyse des interstratifications triples*
(Courbes d'isoéquidistances apparentes)

Les points situés sur les trois axes représentent des mélanges binaires. BROWN et MAC EWAN ont déterminé les espacements correspondants par des calculs qui ont été rappelés dans la première partie. Si ce calcul est possible pour les mélanges binaires, il est à peu près inextricable pour les mélanges ternaires, il faut donc recourir à une détermination expérimentale. C'est ainsi que JONAS et BROWN ont procédé. Théoriquement, une infinité de combinaisons ternaires peut donner le même espacement

apparent, et la courbe qui joint les points représentatifs de cet espacement a pour extrémités sur les axes les deux points équivalents des mélanges binaires. On peut ainsi obtenir un ensemble de courbes « d'isoéquidistances apparentes » qui joignent tous les points représentatifs des mélanges binaires ou ternaires correspondant au même espacement apparent.

Les courbes déterminées par JONAS et BROWN ne s'écartent qu'assez faiblement des droites qui joignent les deux points équivalents portés sur les côtés du triangle, Les courbes d'isoéquidistances sont donc représentées par ces droites sur le diagramme de la figure 31.

La détermination des composants d'un mélange à l'aide du diagramme de la figure 31 reste assez imprécise ; mais ce diagramme peut toutefois permettre d'apporter un schéma satisfaisant du processus d'ouverture des espaces interfeuillets de la montmorillonite, au cours de l'hydratation.

b) *Schéma des processus d'ouverture de la montmorillonite*

Sur la figure 31, le point représentatif d'un système montmorillonite-eau partant de l'état A (feuillets accolés) et évoluant vers l'état C (deux couches d'eau interfeuillets) peut évidemment suivre une infinité de parcours. Le trajet choisi doit en réalité respecter les caractères particuliers du processus d'hydratation du système, ce qui limite le choix.

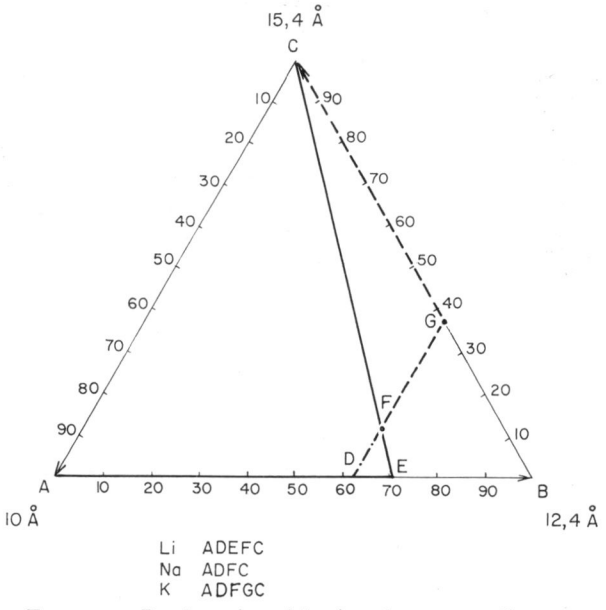


FIG. 32. — *Représentation schématique du processus d'ouverture des espaces interfeuillets de la montmorillonite*

En prenant comme premier exemple le schéma théorique d'hydratation des figures 4 et 5, on voit aisément que le point représentatif du système partant de A se déplace vers B suivant l'axe AB, puis vers C suivant l'axe BC. On pourrait de même imaginer théoriquement un système passant directement de A à C. Ce sont là deux cas

extrêmes et les comportements des différents échantillons de montmorillonite s'en écartent plus ou moins.

Pour schématiser le mécanisme d'ouverture des espaces interfeuillets de la montmorillonite au cours de l'hydratation, on peut décrire, sur un diagramme triangulaire, des parcours qui rendent compte des conclusions de la première partie de ce travail.

Dès que la pression partielle de vapeur d'eau s'écarte de zéro, une grande partie des feuillets s'ouvre rapidement à 12,4 Å, et le reste demeure à 10 Å : le point représentatif du système parcourt donc l'axe AB (fig. 32) jusqu'au pourcentage d'intervalles à 12,4 Å correspondant au palier de la courbe de la figure 3. C'est-à-dire jusqu'au point D pour les montmorillonites Na et K (~ 63 p. 100 d'espacements à 12,4 Å) et jusqu'au point E pour la montmorillonite Li (~ 70 p. 100 d'espacements à 12,4 Å).

Lorsque le premier palier des courbes d'ouverture est dépassé, les trois systèmes passent par un état d'interstratification triple ; autrement dit, leur point représentatif quitte l'axe AB pour décrire une courbe intérieure au triangle ABC [1].

1° *Montmorillonite K.*

On a vu qu'après le palier correspondant à 63 p. 100 d'espacements à 12,4 Å (point D), la montmorillonite K suit pratiquement le schéma d'ouverture théorique des figures 4 et 5 ; c'est-à-dire que le point représentatif du système n'effectue qu'un parcours réduit à l'intérieur du triangle ABC et arrive en C en suivant une grande partie de l'axe BC. Le processus d'ouverture des feuillets de la montmorillonite K peut donc être schématisé par le parcours ADGC du diagramme de la figure 32.

2° *Montmorillonite Li.*

Le palier des 70 p. 100 d'espacements à 12,4 Å franchi, la montmorillonite Li passe très rapidement à 15,4 Å, en s'écartant considérablement du schéma théorique. C'est-à-dire que les feuillets passent, soit de 12,4 Å à 15,4 Å, soit directement de 10 Å à 15,4 Å. Ce processus d'ouverture est représenté par le parcours AEC du diagramme triangulaire.

3° *Montmorillonite Na.*

Le comportement de la montmorillonite Na est d'abord voisin de celui de la montmorillonite K, puis devient identique à celui de la montmorillonite Li après le palier de 63 p. 100 d'intervalles à 12,4 Å (voir aussi au sujet du comportement intermédiaire de la montmorillonite Na, les figures 1 et 2). Ce caractère de la montmorillonite Na est mis en évidence en choisissant le parcours ADFC du diagramme triangulaire ; la partie ADF est commune avec la montmorillonite K, et la partie FC avec la montmorillonite Li.

c) *Application — Stabilité de la monocouche*

Tout point pris sur les parcours ADFG et ADEFC du diagramme de la figure 32 représente un (et un seul) mélange de deux ou de trois phases. Ce diagramme permet

[1] Le nombre de courbes possible est évidemment infini. Il semble toutefois logique de suivre des trajets linéaires, en l'absence d'informations supplémentaires qui pourraient justifier un autre choix.

en outre de déterminer pour chaque point la composition du mélange, c'est-à-dire la proportion de chacune des phases qui le constituent (10 Å, 12,4 Å ou 15,4 Å).

A chaque point est d'autre part attaché un espacement apparent d_{001} donné, que nous pouvons repérer sur la figure 31.

On voit ainsi qu'à chaque valeur de l'espacement apparent d_{001} des échantillons de montmorillonite étudiés, doit correspondre une proportion définie de la phase à 12,4 Å.

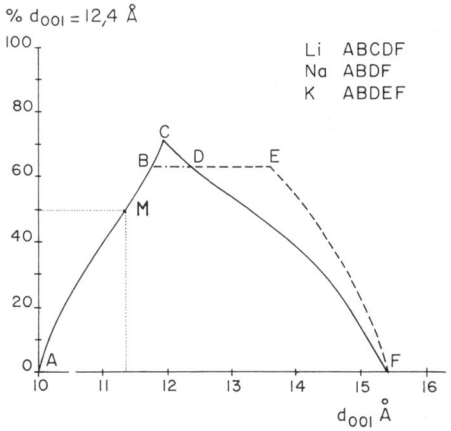


FIG. 33. — *Pourcentage d'espacements à 12,4 Å de la montmorillonite, en fonction de l'espacement apparent* d_{001}

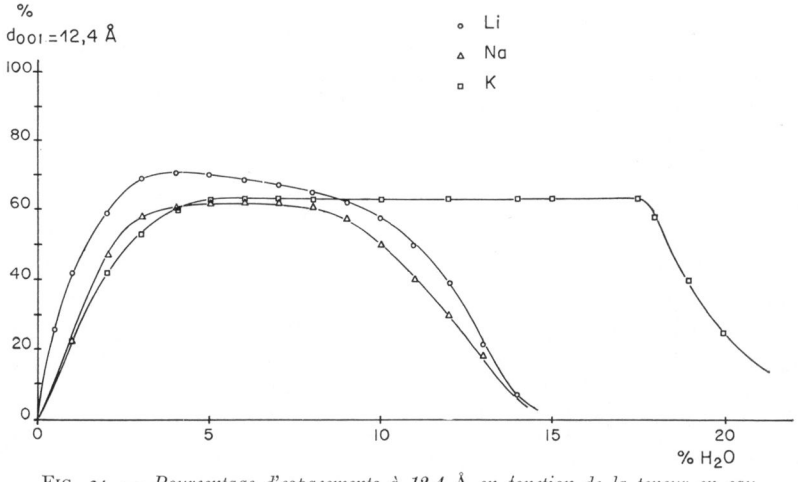


FIG. 34. — *Pourcentage d'espacements à 12,4 Å en fonction de la teneur en eau, pour les montmorillonites Li, Na et K*

La figure 33 représente le pourcentage d'espacements à 12,4 Å (état monocouche) des montmorillonites Li, Na et K, en fonction de l'espacement apparent d_{001}. A titre d'exemple, le point M correspond à un système donnant un espacement apparent de 11,4 Å, et contenant pour les montmorillonites Li, Na et K, la même proportion de 50 p. 100 d'espacements à 12,4 Å.

Le graphique de la figure 33 associé aux courbes de la figure 3 permet de déterminer pour chaque teneur en eau, la proportion des trois phases dans les différents échantillons. Nous pouvons de cette façon étudier la stabilité de chacune des phases au cours du processus d'hydratation.

La figure 34 représente, pour les trois échantillons de montmorillonite, le pourcentage d'espacements à 12,4 Å en fonction de la teneur en eau. On voit, ici encore, que la stabilité de la monocouche au cours de l'adsorption est plus grande avec le potassium qu'avec le lithium et le sodium. De plus, ces nouvelles indications permettent de rechercher les liaisons qui existent éventuellement entre les diverses propriétés diélectriques et les différents états du minéral.

La comparaison des figures 29 (qui représente, rappelons-le, la variation des pertes maxima par effet dipolaire en fonction des teneurs en eau) et 34 est révélatrice des rapports étroits qui existent entre l'absorption dipolaire et la monocouche. On peut voir en effet que les domaines d'existence de l'absorption dipolaire sont absolument comparables aux domaines d'existence de l'espacement interfeuillets correspondant à une monocouche ; et que les intensités de l'absorption varient sensiblement comme la proportion d'espacements à 12,4 Å dans les différents échantillons de montmorillonite.

Cette concordance des résultats, compte tenu des approximations faites et de la précision des mesures, tant en ce qui concerne les propriétés diélectriques, que la détermination des proportions d'espacements monocouche, souligne qu'il ne s'agit ni d'un effet secondaire, ni d'une simple coïncidence.

On peut cependant remarquer que les mesures par diffraction de rayons X ont été faites à + 20°C, alors que l'absorption diélectrique se manifeste dans le domaine des ondes kilométriques à — 80°C. Il existe donc une relation directe entre les structures de l'eau à basse température et à température ambiante.

Pour vérifier cette hypothèse, nous avons établi des diagrammes de diffraction de rayons X jusqu'à — 130°C, et ceux-ci ne font effectivement pas apparaître de variations des distances interfeuillets par rapport à 20°C (dans le cas des teneurs en eau inférieures à 20 p. 100).

3. Rapports entre les propriétés diélectriques et les états d'hydratation de la montmorillonite

Les propriétés diélectriques de la montmorillonite sont essentiellement attribuées à la présence de l'eau adsorbée et aux interactions cation-eau.

Les mécanismes proposés pour rendre compte de la conductivité et de l'absorption dipolaire sont analogues à ceux que l'on peut rencontrer dans la glace. Ces derniers sont cependant profondément modifiés par la présence des cations qui jouent un rôle d'impuretés (présence de charges résiduelles positives dans les couches d'eau), et un rôle stabilisateur ou perturbateur dans la structure des couches d'eau fixées à la surface du minéral.

Le recoupement des données de la diffraction des rayons X et des mesures diélectriques permet de résumer dans un tableau schématique, les différents résultats obtenus au cours des précédents chapitres.

On peut remarquer que chaque état d'hydratation de la montmorillonite présente des caractères spécifiques. Certaines propriétés diélectriques des systèmes argile-eau

TABLEAU 7

Nombre de couches d'eau	Absorption dipolaire	Conductivité basse température (extrinsèque)	Conductivité moy. température (intrinsèque)	Singularité à 273°K cassure ou saut de conductivité	Nouveau domaine de conductivité à T > 273°K
1	+	+	+	—	—
2	—	+	+	+ cassure	+
> 2	—	+	+	+ saut de conductivité	+

(Nota : le signe + signifie que le phénomène existe, le signe — qu'il n'existe pas).

sont étroitement liées à une structure donnée, et d'autres sont, par contre, communes à plusieurs états de ces mêmes systèmes. C'est ainsi que :

a) *La formation d'une couche monomoléculaire d'eau dans les espaces interfeuillets de la montmorillonite entraîne :*

1° L'apparition dans le domaine des ondes kilométriques, à basse température, d'une absorption dipolaire caractéristique de la structure de l'eau adsorbée.

L'étendue des domaines d'hydratation pour lesquels se manifeste cette absorption dipolaire, est en relation étroite avec la nature du cation compensateur qui joue un rôle déterminant dans la stabilité de la monocouche.

2° La manifestation de phénomènes de pertes par conductivité selon deux processus définis, pour des températures comprises entre 130°K et 330°K.

Le passage par 273°K ne fait apparaître aucune singularité dans les phénomènes de conductivité observés, il semble par conséquent que la structure de l'eau adsorbée sous forme d'une monocouche est très stable vis-à-vis de la température.

b) *L'évolution des systèmes de l'état monocouche vers un état à deux couches a pour conséquence :*

1° La disparition progressive de l'absorption dipolaire, ce qui doit correspondre à une modification sensible de la structure de l'eau adsorbée.

2° L'apparition d'un nouveau domaine de pertes par conductivité au-dessus de 723°K.

Jusqu'à la température de 273°K, les deux domaines de conductivité initiaux ne sont pas affectés par le passage à deux couches. Il peut cependant se produire, pour les plus fortes teneurs en eau (supérieures à 25 p. 100), un saut de la conductivité au voisinage de 273°K. Ce saut peut être interprété par un changement de phase de l'eau adsorbée.

CHAPITRE II

INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX A PARTIR D'UN MODÈLE STRUCTURAL DE LA MONOCOUCHE

1. Structure et propriétés de la monocouche

Les conclusions du chapitre précédent soulignent que chaque ensemble de couches d'hydratation présente des caractères spécifiques. Cependant les résultats des expériences rapportées dans le présent travail concernent surtout l'eau adsorbée sous la forme d'une couche unique.

La formation de la monocouche paraît révélatrice d'un comportement spécifique du minéral. Cela n'est pas étonnant puisque la première couche est, plus que toutes celles qui peuvent être adsorbées par la suite, en relation étroite avec la surface du silicate.

Les résultats expérimentaux ont surtout mis l'accent sur les interactions cation-eau, mais on ne doit pas négliger le rôle des surfaces cristallines. C'est donc en gardant présente à l'esprit la nécessité d'associer les trois éléments cation, eau, surface, que la recherche d'un modèle structural de la monocouche peut être entreprise.

Les éléments de base de l'association monocouche-surface cristalline sont d'abord définis. Un modèle est ensuite proposé et on montre enfin que ce modèle permet de rendre compte de l'ensemble des résultats expérimentaux.

a) *Recherche et description d'un modèle*

α) Éléments de base.

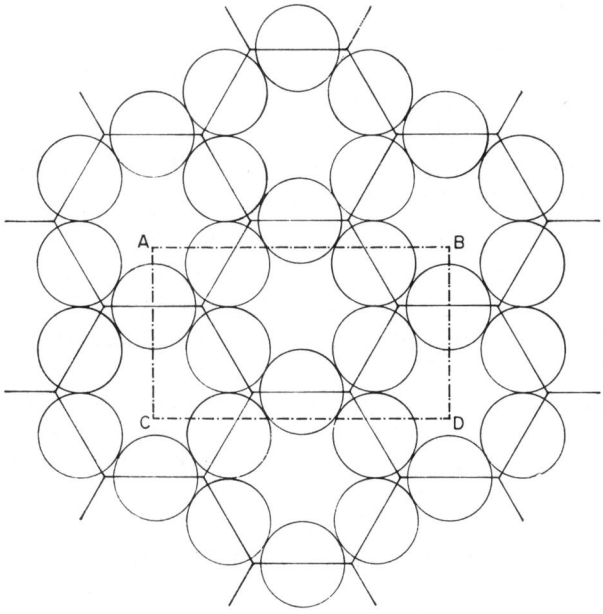
1° *Répartition des cations à la surface des feuillets.*

La surface des feuillets est formée d'atomes d'oxygène délimitant des cavités hexagonales au niveau desquelles sont fixés les cations. La maille élémentaire du minéral comprend quatre de ces cavités hexagonales (fig. 35).

La masse molaire de la montmorillonite est de 720 g et sa capacité d'échange de 94 milliéquivalents pour 100 grammes, il y a donc :

$$\frac{720 \times 94}{100} = 680 \text{ méq. par maille-gramme.}$$

Ce chiffre correspond à 0,68 cation monovalent par maille, c'est-à-dire à 0,17 cation par cavité hexagonale, soit très sensiblement à un cation pour six cavités hexagonales du même feuillet (ou ce qui revient au même pour six cavités hexagonales de l'ensemble formé par les plans en contact de deux feuillets adjacents).



Feuillet vu ⊥ au Plan 001. (Seuls les oxygènes de la couche tétraédrique sont représentés.)
ABCD: contour de la maille élémentaire.
AB = a = 5,3 Å
AB = b = 9,05 Å

FIG. 35. — *Réseau des atomes d'oxygène de la surface des feuillets de montmorillonite*

La répartition des cations à la surface du minéral est désordonnée, ceux-ci ne sont donc pas distribués régulièrement sur l'ensemble des cavités hexagonales (S. B. HENDRICKS, 1945 ; J. MERING, R. GLAESER, 1954). De plus, chaque cation n'est pas partagé entre les deux feuillets adjacents, mais appartient à l'un d'eux (situation dissymétrique).

2° *État d'hydratation des cations.*

Dans le déroulement du processus d'adsorption de l'eau par les différents échantillons de montmorillonite, on a vu que la monocouche ne se forme pas dans la totalité des espaces interfeuillets ; elle présente cependant une importance relative maximum pour certains états d'hydratation (fig. 34). Étant donné que la proportion maximum d'espacements monocouche correspond parallèlement à des effets diélectriques maxima, il est nécessaire de déterminer le rapport qui existe alors entre le nombre de molécules d'eau et le nombre de cations compensateurs. On peut calculer une valeur moyenne de ce rapport, en admettant d'une part, que les cations sont répartis de façon identique sur les surfaces externes et internes des cristallites, et d'autre part,

que l'état d'hydratation est sensiblement le même pour tous les cations. Il a été montré que dans la première phase de l'hydratation, phase qui aboutit à la monocouche, environ un tiers des feuillets demeurent « fermés » ; on effectue donc le calcul en ne tenant compte que des cations effectivement hydratables, c'est-à-dire de ceux qui correspondent aux surfaces accessibles.

Le calcul utilise les données suivantes :

Capacité d'échange totale	94 méq/100 g
Surface spécifique totale	810 m^2/g
Surface interne	720 m^2/g
Surface externe	90 m^2/g
Capacité d'échange surface interne	84 méq/100 g
Capacité d'échange surface externe	10 méq/100 g

Montmorillonite Li.

La proportion maximum de feuillets à 12,4 Å, 71 p. 100, est obtenue pour une teneur en eau comprise entre 3 et 4 p. 100.

La fraction de la capacité d'échange « hydratable » est, dans ces conditions :

Surface externe	10 méq/100 g
Surface interne	60 méq/100 g
Total	70 méq/100 g

d'autre part :

	3,5 p. 100 d'eau correspondent à	195	mmole/100 g
et	4 p. 100 — à	222	mmole/100 g

Le rapport eau-cation est par suite :

$$\text{pour 3,5 p. 100 d'eau} : \frac{195}{70} = 2{,}8$$

$$\text{pour 4 p. 100 d'eau} : \frac{222}{70} = 3{,}2$$

Il y a donc en moyenne 3 molécules d'eau par cation.

Montmorillonites Na et K.

La proportion maximum de feuillets à 12,4 Å, 63 p. 100, est obtenue entre 5 et 6 p. 100 d'eau.

Fraction de capacité d'échange « hydratable » :

Surface externe	10 méq/100 g
Surface interne	53 méq/100 g
Total	63 méq/100 g

Quantité d'eau adsorbée :

	5,5 p. 100 correspondent à	303	mmole/100 g
et	6 p. 100 correspondent à	333	mmole/100 g

Rapport eau-cation :

$$\text{à 5,5 p. 100 d'eau} : \frac{306}{63} = 4{,}85$$

$$\text{à 6 p. 100 d'eau} : \frac{334}{63} = 5{,}3$$

Il y a donc en moyenne 5 molécules d'eau par cation.

Montmorillonite Cs.

La proportion maximum de feuillets à 12,4 Å est de 100 p. 100 entre 9 et 10 p. 100 d'eau adsorbée.

Capacité d'échange hydratable ..... 94 méq/100 g

Quantité d'eau adsorbée :

à 9 p. 100 ..... 500 mmole/100 g

à 10 p. 100 ..... 555 mmole/100 g

Rapport eau-cation :

$$\text{à } 9 \text{ p. } 100 \text{ d'eau} : \frac{500}{94} = 5{,}3$$

$$\text{à } 10 \text{ p. } 100 \text{ d'eau} : \frac{555}{94} = 5{,}8$$

L'ordre de grandeur est donc aussi de 5 molécules d'eau par cation.

3° *Mode de superposition des feuillets.*

C'est un point important puisqu'il faut tenir compte de l'ensemble des deux surfaces entre lesquelles s'organisent les molécules d'eau.

Les types d'empilements dans les phyllites se ramènent à trois (G. PEDRO, 1965), mais ce sont les positions relatives des cavités hexagonales de deux feuillets adjacents qui sont ici intéressantes à connaître, et non les positions relatives des mailles des deux réseaux ; on distinguera donc les cas suivants (on peut se reporter à la figure 35) :

Superposition régulière.

Les cavités hexagonales de deux feuillets adjacents sont exactement face à face, ce qui correspond à une périodicité rigoureuse, ou à des rotations des feuillets de 60° ou 120° autour de l'axe commun des cavités hexagonales.

Désordre translationnel.

Les feuillets sont empilés avec des translations régulières qui font généralement intervenir un glissement suivant l'axe b d'un vecteur multiple de $b/3$ (J. ESCARD-LONGUET et *al.*, 1960). Une rotation des feuillets de 60° ou 120° ne modifie pas la position relative des cavités hexagonales.

Désordre complet

Les feuillets subissent les uns par rapport aux autres des translations et des rotations quelconques. Ce type d'empilement est appelé « turbostratique ».

Le problème posé par le mode de superposition des feuillets de montmorillonite n'est pas encore aujourd'hui résolu de façon satisfaisante. On s'accorde pourtant à reconnaître que cet empilement n'est pas réellement turbostratique, mais fait vraisemblablement intervenir des translations du type $b/3$. C'est en effet un moyen d'interpréter les caractères particuliers des bandes de diffraction hk, où k est un multiple de 3 (J. ESCARD-LONGUET et *al.*, 1960 ; A. OBERLIN, J. MERING, 1962).

4° *Organisation en couche des molécules d'eau.*

De nombreux auteurs admettent que la structure de l'eau interfeuillets présente une configuration régulière définie (J. E. GIESEKING, 1949 ; R. E. GRIM, 1953 ; H. PEZERAT, J. MERING, 1958), et vraisemblablement des similitudes avec la struc-

ture de la glace (H. H. MACEY, 1942 ; E. FORSLIND, 1948 ; C. T. DE WIT et P. L. ARENS, 1950). On a montré, ici même, que certaines propriétés mesurées ont des caractéristiques analogues à celles que l'on peut déterminer de la même manière pour la glace. Nous rappelons donc brièvement les traits essentiels de la structure de la glace normale (J. D. BERNAL, R. H. FOWLER, 1933) : chaque molécule d'eau se trouve au centre d'un tétraèdre dont les quatre sommets sont occupés chacun par une molécule d'eau. La molécule centrale échange avec ses voisines quatre liaisons hydrogène. Deux de ces liaisons font intervenir les protons de la molécule d'eau, et les deux autres, les orbitales négatives dirigées suivant les deux autres directions tétraédriques.

Les quatre liaisons hydrogène forment donc entre elles des angles très peu différents de 110°, et chaque molécule d'eau occupe un volume sphérique de 1,38 Å de rayon.

Dans la glace hexagonale, la répartition des molécules d'eau est telle que l'on peut distinguer des couches dans lesquelles ces molécules d'eau sont distribuées suivant des hexagones du type « chaise » (fig. 36). C'est une couche d'eau bâtie sur ce modèle qui est utilisée dans certains des schémas déjà proposés pour la structure de l'eau adsorbée par les phyllites, et qui sera finalement adoptée dans le modèle que nous décrirons.

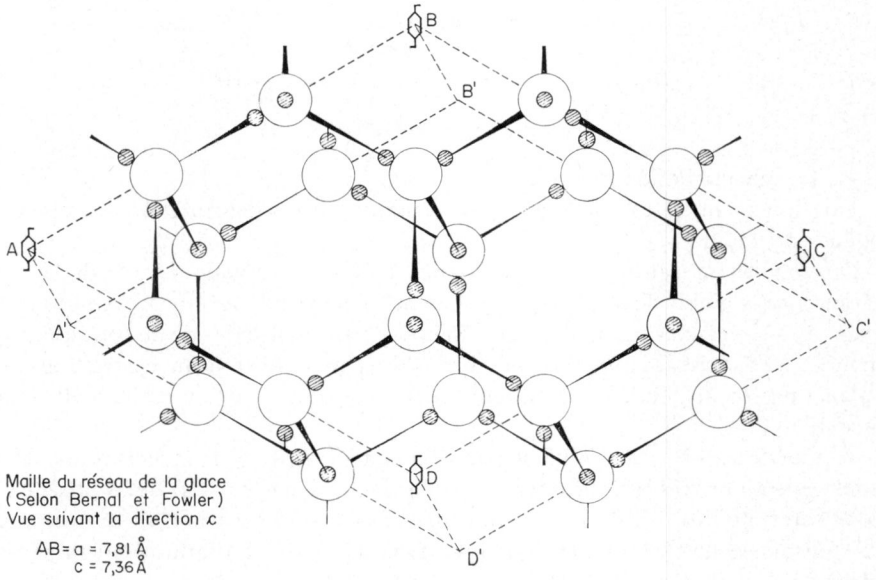


FIG. 36. — *Structure de la glace hexagonale*

β) *Étude critique des modèles existants.*

Les différents modèles de couches d'eau respectent tous une répartition hexagonale des molécules, mais soit en couches planes, soit suivant une conformation identique à celle des couches de la glace.

— Le schéma de HENDRICKS-JEFFERSON (1938).

Les molécules d'eau forment un réseau hexagonal plan dont les dimensions sont identiques à celles du réseau des oxygènes de base des tétraèdres de la couche tétraé-

drique du silicate. Une molécule d'eau sur deux est liée par une liaison hydrogène à un oxygène du réseau de l'argile (fig. 37).

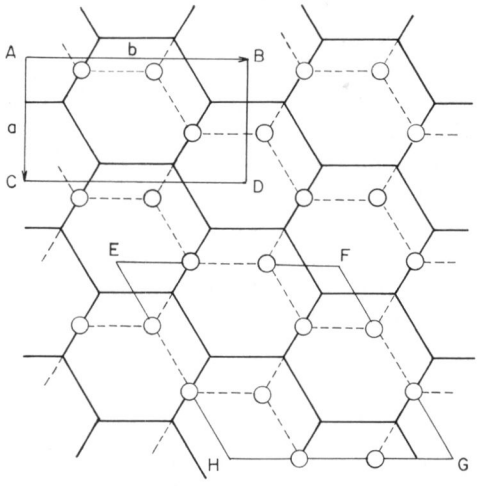


FIG. 37. — *Répartition des molécules d'eau adsorbées à la surface des feuillets de montmorillonite* (selon HENDRICKS-JEFFERSON)

— Le schéma de MACEY (1942).

Une couche du réseau de la glace est superposée sans déformations au réseau des oxygènes du feuillet.

On voit sur la figure 38, que le losange EFGH est l'image exacte de la moitié supérieure de la maille de la glace (fig. 36), et la longueur EF mesure 7,8 Å comme dans la glace. Les hexagones ont une forme « chaise » : trois molécules d'eau sont au contact du feuillet, et exactement superposées à trois oxygènes, les trois autres sont au-dessus du plan tangent au feuillet et peuvent par conséquent venir au contact du feuillet adjacent.

— Ces deux schémas semblent parfaitement s'adapter à la structure du silicate. ils sont cependant très insuffisants, car ils ne tiennent pas compte de la présence des cations interfoliaires. Or il est indispensable d'associer les cations à la structure de l'eau, puisque ceux-ci sont déterminants dans le mode d'hydratation du minéral. C'est ce qui a déjà conduit A. MATHIESON et G. F. WALKER (1954) à proposer, pour la vermiculite, une structure des couches d'eau interfeuillets différente de celle de HENDRICKS-JEFFERSON (la structure de MATHIESON et WALKER n'est pas applicable au cas de la montmorillonite, car elle correspond à deux couches d'eau, et à une position « symétrique » des cations interfoliaires).

— Si l'on adopte une structure en couche du type glace, on peut y associer assez simplement les cations en les substituant à un certain nombre de molécules d'eau. Mais les cations sont en principe fixés au niveau des cavités hexagonales, il faut donc que certaines molécules d'eau se trouvent aussi sur de tels sites.

On doit en outre s'assurer qu'une couche d'eau bâtie de cette manière peut être

effectivement adaptée aux espaces interfeuillets de la montmorillonite, et qu'elle rend compte des propriétés de la monocouche.

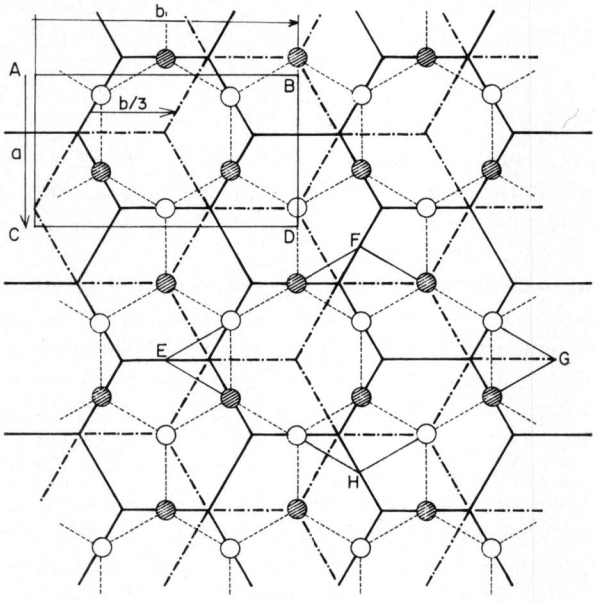


FIG. 38. — *Répartition des molécules d'eau adsorbées à la surface des feuillets de montmorillonite*
(selon MACEY)

Le paragraphe « éléments de base » fixe un certain nombre de caractères de cette structure, auxquels il faut ajouter des conditions d'ordre stérique.

En résumé, il faut que l'arrangement des molécules d'eau interfeuillets respecte :

1. L'espacement interfeuillets de 12,4 Å correspondant à la monocouche.
2. La position des cations au niveau des cavités hexagonales.
3. La répartition égale des cations entre les réseaux de deux feuillets adjacents (situation « dissymétrique »).
4. La répartition désordonnée des cations au niveau de chaque réseau.
5. Le mode de superposition des feuillets.
6. L'état d'hydratation des cations.
7. La liaison des molécules d'eau avec les cations.
8. La liaison des molécules d'eau entre elles, selon un modèle du type glace.
9. La liberté des mouvements des molécules d'eau conformes aux résultats des mesures diélectriques.

L'arrangement des molécules d'eau finalement choisi devra évidemment respecter les neuf conditions énoncées ci-dessus.

A priori, il n'est pas impossible que, moyennant quelques aménagements, les schémas de HENDRICKS-JEFFERSON et de MACEY soient susceptibles de répondre à ces conditions.

1° *Le schéma de* HENDRICKS-JEFFERSON.

La couche d'eau est plane, mais on peut donner aux hexagones qui la constituent une configuration « chaise » : le réseau devient ainsi analogue à celui de la glace, mais la maille est légèrement distendue. Le côté EF de cette maille (fig. 37) vaut en effet environ 9 Å, contre 7,8 Å dans la glace.

Cependant, le mode de superposition de la couche d'eau au feuillet ne répond pas aux conditions posées, car aucune molécule d'eau ne se trouve au centre d'une cavité hexagonale. On ne peut donc pas associer les cations au réseau de l'eau en opérant des substitutions molécule d'eau-cation. D'autre part, il n'est tenu aucun compte du mode de superposition des deux feuillets adjacents.

2° *Le schéma de* MACEY.

On voit sur la figure 38 que certaines molécules d'eau sont au centre des cavités hexagonales du feuillet, il est par conséquent possible d'associer les cations à la couche d'eau tout en respectant le réseau de la glace adopté par MACEY. Il y aurait en moyenne un peu plus de six molécules d'eau par cation. Les conditions 2, 3, 6, 7 et 8 sont ainsi respectées, mais il faut faire intervenir en plus le mode de superposition des feuillets.

— Superposition régulière.

Les conditions 1 et 8 s'excluent mutuellement. En effet la plupart des molécules d'eau sont prises entre deux oxygènes des feuillets adjacents (voir par exemple les molécules des côtés EF et EH de la maille EFGH). Le respect de la condition 1 obligerait donc à placer toutes les molécules d'eau dans le même plan (et par suite à rendre coplanaires trois liaisons hydrogène sur quatre de chaque molécule d'eau), ce qui est contraire à 8. D'autre part, le respect de la condition 8 ferait porter l'espacement interfeuillets à environ 13 Å.

— Glissement de $b/3$.

Il n'y aurait alors aucune molécule d'eau dans l'axe des cavités hexagonales de l'un des feuillets (fig. 38), les cations de ces feuillets ne pourraient donc pas être associés à la structure de l'eau.

— Désordre complet.

Des rotations ou des translations quelconques ne permettent pas non plus de placer les molécules d'eau en face des cavités hexagonales du feuillet.

3° *Conclusion.*

Les schémas de HENDRICKS-JEFFERSON et de MACEY n'apportent pas de solution satisfaisante au problème de la structure de l'eau interfeuillets. D'autres schémas ont été proposés, en particulier par I. BARSHAD (1949), qui superpose six molécules d'eau aux six positions tétraédriques entourant une cavité hexagonale. On peut cependant lui appliquer sensiblement les mêmes critiques.

Il nous a donc paru nécessaire de rechercher une configuration qui, apparentée aux précédentes, soit cependant à l'abri des principales critiques formulées ci-dessus.

γ) *Description d'un modèle de monocouche.*

Le modèle que nous proposons est caractérisé par le fait que toutes les molécules d'eau de la monocouche se trouvent centrées sur les cavités hexagonales du réseau de l'argile. Toutes les cavités hexagonales sont ainsi occupées, soit par une molécule d'eau, soit par un cation, ce qui conduit à une structure de couche continue dans laquelle on peut considérer schématiquement que des cations ont été substitués à des molécules d'eau.

Nous allons envisager successivement les différentes caractéristiques de ce modèle :

1° *Répartition des molécules d'eau.*

Sur le réseau d'un feuillet (fig. 39), chaque cavité hexagonale est initialement supposée occupée par une molécule d'eau (cercles foncés). Le même nombre de molécules d'eau (cercles clairs) doit être placé au-dessus du feuillet, pour permettre une répartition identique au niveau du feuillet adjacent. Par raison de symétrie, ces molécules se placent nécessairement sur les bases de trois des tétraèdres entourant la cavité hexagonale.

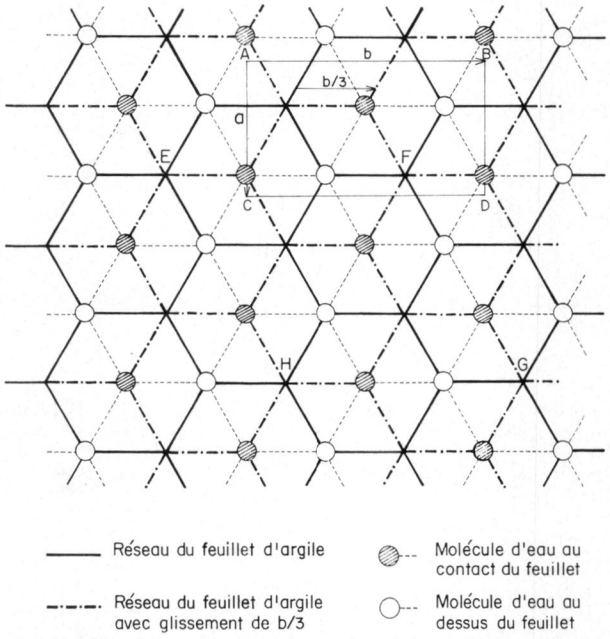


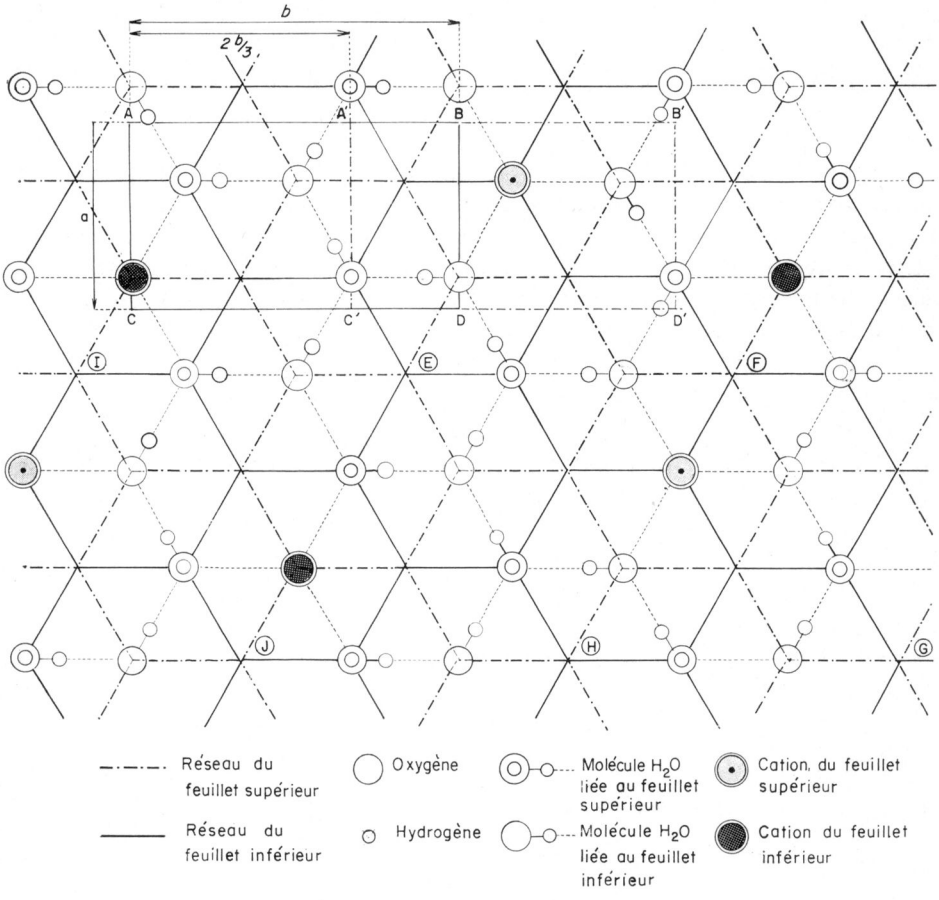
FIG. 39. — *Modèle pour la monocouche d'eau adsorbée par la montmorillonite*

La configuration obtenue correspond bien à une couche du type glace, les molécules d'eau constituent en effet des hexagones de forme « chaise ».

Un réseau analogue à celui de la glace (fig. 36) est défini à partir du losange EFGH de la figure 39.

La couche d'eau obtenue ne peut s'intercaler de façon symétrique entre deux feuillets adjacents de montmorillonite que si l'on fait glisser les réseaux de cavités hexagonales de ces deux feuillets de $b/3$ (environ 3 Å) l'un par rappor à l'autre. On aboutit de cette façon à la représentation complète de la figure 39.

Une rotation des feuillets de 60° ou de 120° ne modifie pas le modèle. De plus, des rotations de l'ordre de quelques degrés autour de cette position moyenne, et des translations de environ 1 Å sont possibles, ce qui ne confère pas à l'ensemble une rigidité aussi grande que la représentation schématique de la figure 39 peut le laisser supposer.



ABCD : Maille du réseau du feuillet inférieur _ A'B'C'D' : Maille du feuillet supérieur _ EFGH : Maille du type glace.

FIG. 40. — *Répartition et état d'hydratation des cations compensateurs de la montmorillonite, dans l'état monocouche*

Le schéma proposé satisfait déjà aux conditions 2, 5, 7 et 8. Il reste à discuter de la répartition et de l'état d'hydratation des cations, ainsi que de l'encombrement du modèle (conditions 1, 3, 4 et 6).

2° *Répartition et état d'hydratation des cations.*

La couche d'eau étant définie, nous devons tenir compte de la présence des cations et de leur position par rapport au réseau de l'argile.

Les cations se trouvent au niveau des cavités hexagonales, et peuvent être, en premier lieu, répartis régulièrement à la surface des feuillets, en respectant le taux d'un cation pour six cavités hexagonales des deux feuillets adjacents. Ceci revient à définir un motif élémentaire à partir duquel on peut reconstituer l'ensemble du réseau par des translations.

— Le motif élémentaire est représenté sur la figure 40 par le losange EFGH qui contient bien un cation pour six cavités hexagonales (trois du feuillet inférieur et trois du feuillet supérieur).

— Le cation du motif EFGH appartient au feuillet supérieur, mais le motif voisin EIJH contient un cation du feuillet inférieur, les cations sont de cette façon également répartis entre les deux feuillets (condition 3).

— Le passage d'une distribution ordonnée des cations à une distribution désordonnée (condition 4) se fait en permutant des cations et des molécules d'eau d'un même feuillet.

— Le rapport du nombre de cations au nombre de molécules d'eau peut être déterminé simplement sur le motif EFGH. Il y a en effet un cation pour cinq molécules d'eau (une intérieure au motif et huit partagées avec les motifs voisins).

Ce chiffre est en parfait accord avec celui qui a été calculé pour les montmorillonites Na, K et Cs. On peut voir en outre que chaque cation est directement lié à trois molécules d'eau, les autres assurant la continuité de la structure de la couche. Les trois molécules d'eau par cation de la montmorillonite Li correspondent donc à un remplissage incomplet : la monocouche de la montmorillonite Li est discontinue et son état d'équilibre correspond à la fixation des trois molécules d'eau les plus proches de chaque cation.

3° *Aspects stériques. Configuration réelle de la monocouche.*

Les schémas des figures 39 et 40 ne font pas intervenir l'encombrement réel des atomes et des molécules, il faut cependant s'assurer que la condition 1 (distance interfeuillets de 12,4 Å pour la monocouche) est respectée. Les figures 41 et 42 montrent que le modèle proposé satisfait bien à cette condition.

— La figure 41 représente la couche supérieure des oxygènes du feuillet (cercles grisés) vue perpendiculairement aux plans 001. Le réseau de l'eau s'y détache en cercles clairs (les molécules d'eau sont assimilées à des sphères de 2,8 Å de diamètre). Le cation (cercle noir) est ici le sodium (rayons 0,95 Å). Le feuillet adjacent n'est pas représenté.

— La figure 42 est une coupe perpendiculaire au plan 001 selon l'axe AB de la figure 41. Les deux feuillets sont représentés avec un glissement de $b/3$ l'un par rapport à l'autre (seuls les atomes d'oxygène ont été dessinés).

Nous avons établi ces schémas en tenant compte des données suivantes :

Les plans de références des atomes d'aluminium des couches octaédriques sont distants de 12,4 Å.

Les molécules d'eau sont centrées sur les axes des cavités hexagonales, ce qui fixe leur position en abscisse.

Les directions de liaisons entre molécules d'eau font entre elles des angles de 110°, conformes à leur coordination tétraédrique. La position des molécules d'eau en ordonnée est donc également fixée.

Le cation Na est placé dans la position déterminée par H. PÉZERAT, J. MERING (1958) ; c'est-à-dire centré sur l'axe des cavités hexagonales, à 4,25 Å du plan des atomes d'aluminium octaédriques.

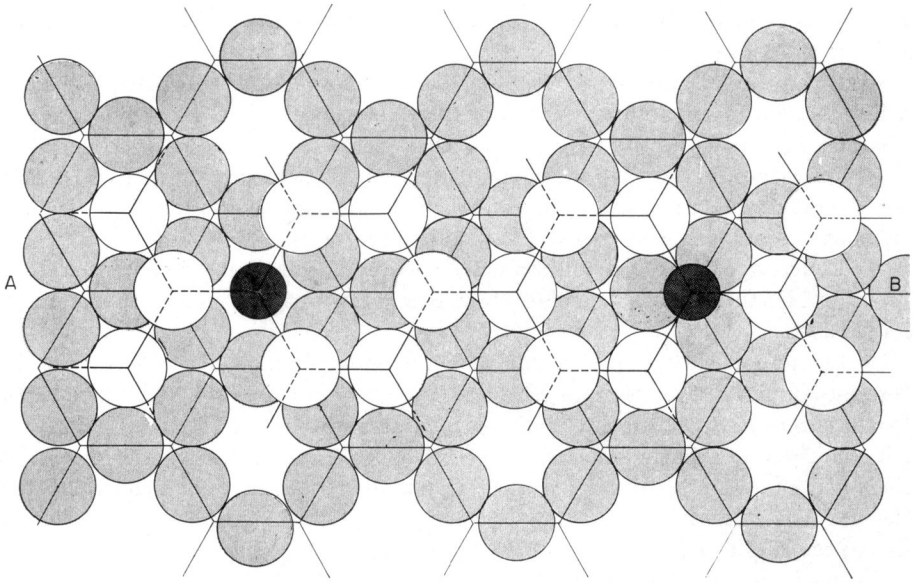


FIG. 41. — *Superposition de la monocouche d'eau, au réseau des atomes d'oxygène du feuillet de la montmorillonite*

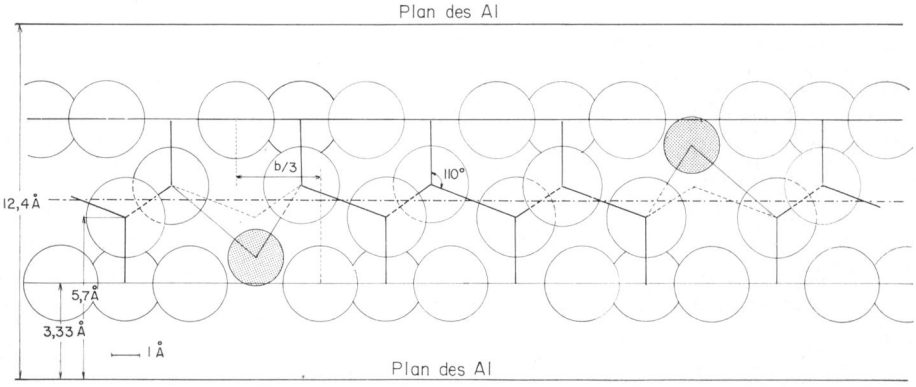


FIG. 42. — *Coupe perpendiculaire au plan de la figure 41, selon l'axe AB*

La figure 42 montre que la couche d'eau ainsi constituée est bien en accord avec une distance interfeuillets de 12,4 Å.

La structure de la « monocouche » à laquelle nous aboutissons montre que celle-ci est en fait formée de molécules d'eau réparties en deux couches planes distinctes dont chacune appartient préférentiellement à un feuillet. Chacune de ces couches est dis-

tante de 5,7 Å du plan de référence des atomes d'aluminium de la couche octaédrique du réseau de l'argile. Ces données sont en excellent accord avec les résultats publiés par H. PEZERAT et J. MERING (1958) et H. PEZERAT (1967) au sujet de la monocouche d'eau de la montmorillonite Na, ainsi qu'en témoigne la courbe (1) de la figure 43 qui représente la projection des densités électroniques sur une perpendiculaire au plan

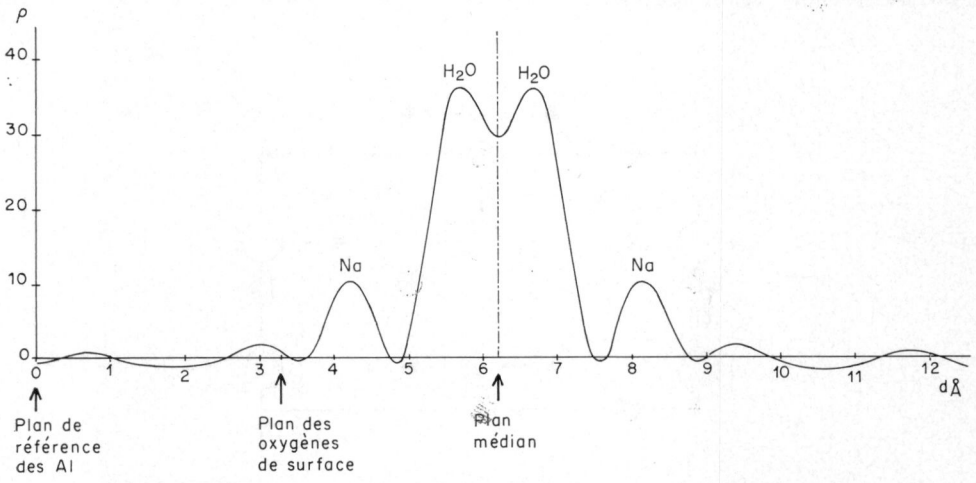


FIG. 43. — *Projection sur une perpendiculaire au plan des feuillets, des densités électroniques de la montmorillonite Na hydratée à une couche d'eau (contribution du réseau soustraite)* (selon H. PEZERAT, 1967)

des feuillets (la contribution du réseau a été préalablement soustraite). Le pic du sodium se trouve à 4,25 Å, et le pic de l'eau à 5,7 Å du plan des atomes d'aluminium. On peut enfin remarquer que le rapport des contenus électroniques des deux pics est égal à cinq, ce qui est tout à fait conforme au chiffre de cinq molécules d'eau par cation que nous-même avons déterminé.

b) *Association du modèle au réseau cristallin de la montmorillonite*

α) *Liaison eau-feuillet.*

La configuration de la monocouche possède un centre de symétrie dans le plan médian de l'espace interfeuillets (fig. 42). La couche d'eau présente donc des propriétés identiques quel que soit le feuillet auquel elle est associée.

Chaque molécule d'eau est placée vis-à-vis d'une cavité hexagonale du feuillet de montmorillonite et dirige une des orbitales de l'atome d'oxygène suivant l'axe de cette cavité. D'autre part, le fond de ces mêmes cavités hexagonales est occupé par un groupement hydroxyle de la couche octaédrique. Il faut donc préciser la nature d'éventuelles interactions H_2O-hydroxyle.

L'atome d'oxygène de chaque groupement hydroxyle échange deux liaisons de coordination avec les deux cations octaédriques voisins ; en ce qui concerne la direction de l'orbitale occupée par le proton, on peut admettre que les déterminations qui

(1) La reproduction de cette courbe est due à l'aimable autorisation de M. H. PEZERAT.

ont été faites sur les micas dioctaédriques (J. M. SERRATOSA, W. F. BRADLEY, 1958 ; W. VEDDER, R. C. MAC DONALD, 1963 ; J. J. FRIPIAT et *al.*, 1965) sont applicables au cas de la montmorillonite. Dans ce cas, la liaison OH fait avec la direction *b* de la maille un angle voisin de 30° (direction AB de la fig. 44), et avec le plan (*a*, *b*) un angle de ± 16° (directions *ox* et *ox'*). Il n'a toutefois pas encore été possible de préciser le signe réel de cet angle.

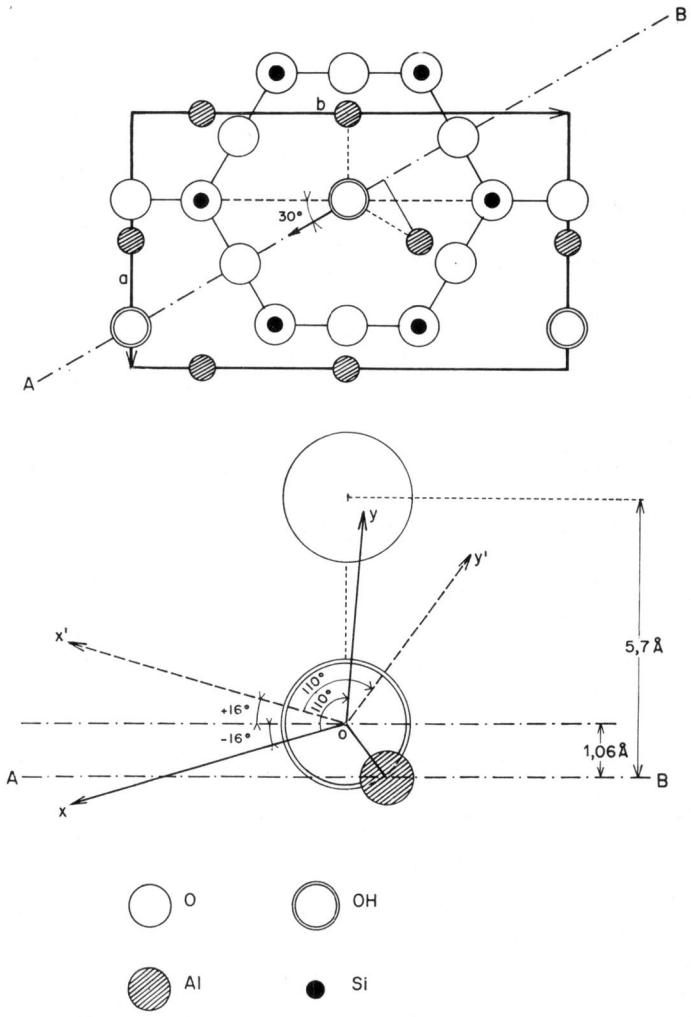


FIG. 44. — *Demi-maille de la montmorillonite, et coupe perpendiculaire suivant AB*

Les directions de trois des orbitales de l'oxygène de l'hydroxyle étant ainsi fixées, la quatrième l'est aussi si l'on respecte une configuration tétraédrique. Cette quatrième orbitale est dirigée suivant *oy* (*ox*, *oy* = 110°) ou suivant *oy'* (*ox'*, *oy'* = 110°). La direction *oy* est très proche de l'axe de la cavité hexagonale (inclinaison 4°), alors que *oy'* s'en écarte plus sensiblement (inclinaison 36°).

Remarquons de plus que les directions *ox* et *oy* définissent avec les directions O-Al une configuration tétraédrique régulière, ce qui n'est pas le cas pour les directions *ox'* et *oy'*.

En conclusion :

— Si l'orbitale libre négative de l'atome d'oxygène du groupement hydroxyle se trouve réellement orientée suivant la direction *oy* (c'est-à-dire très voisine de l'axe de la cavité hexagonale) un proton de la molécule d'eau peut pénétrer dans la cavité hexagonale, et assurer la liaison de la molécule au feuillet en échangeant une liaison du type hydrogène avec l'hydroxyle du réseau. Cependant la distance entre les deux oxygènes est bien supérieure à celle d'une liaison hydrogène normale, d'autres interactions peuvent donc intervenir.

— La fixation des molécules d'eau au niveau des cavités hexagonales peut apparaître comme un argument pour attribuer la direction *ox* à la liaison O—H des hydroxyles du réseau.

β) *Liaisons entre molécules d'eau.*

La couche d'eau interfeuillets présente une structure analogue à celle de la glace. Le réseau est toutefois légèrement distendu (le paramètre *a* de la maille mesure 9 Å contre 7,8 Å dans la glace), ce qui a pour effet d'affaiblir les liaisons hydrogène.

L'introduction des cations dans le réseau, et les interactions eau-feuillet donnent à cette structure des propriétés particulières dont les mesures de caractéristiques diélectriques traduisent quelques aspects. Ces caractéristiques diélectriques sont attribuées à l'existence de différents mécanismes qui donnent aux protons un rôle prépondérant, et l'examen du modèle proposé permet de déceler l'origine de ces mécanismes :

Les deux protons d'une même molécule d'eau peuvent avoir des rôles différents, l'un d'eux assurant la liaison H_2O—feuillet, l'autre la liaison H_2O—H_2O. Ce comportement peut être à l'origine de certaines propriétés spécifiques de la monocouche :

— Si l'on admet, en premier lieu, que chaque molécule d'eau est liée à un feuillet de montmorillonite par l'intermédiaire d'un de ses deux protons, les liaisons entre les molécules d'eau doivent être assurées par les protons restants.

Étant donné le mode de liaison des molécules d'eau aux feuillets, des différences sensibles peuvent apparaître entre les propriétés des couches d'eau interfeuillets et celles des couches d'eau adsorbées sur les surfaces externes, les deux cas sont donc envisagés séparément.

1° *Cas des espaces interfeuillets.*

Le motif élémentaire EFGH de la figure 40 contient statistiquement cinq molécules d'eau, il y a donc cinq protons disponibles pour assurer les liaisons H_2O—H_2O à l'intérieur du motif (les liaisons H_2O—cation n'utilisent pas de protons).

On peut dénombrer quatre liaisons H_2O—H_2O à l'intérieur du motif, et quatre liaisons partagées avec les motifs voisins. Cela fait statistiquement six liaisons H_2O—H_2O par motif élémentaire.

Le bilan révèle donc un « déficit » d'un proton pour chaque motif élémentaire Ce déficit affecte en réalité, soit une liaison entre deux molécules d'eau, soit une liaison eau—feuillet.

La figure 45 où l'on a représenté uniquement le réseau de la monocouche d'eau, met en évidence ces liaisons « anormales » (indiquées par des flèches ; les liaisons eau—feuillet sont supposées normales dans le cas de cette figure).

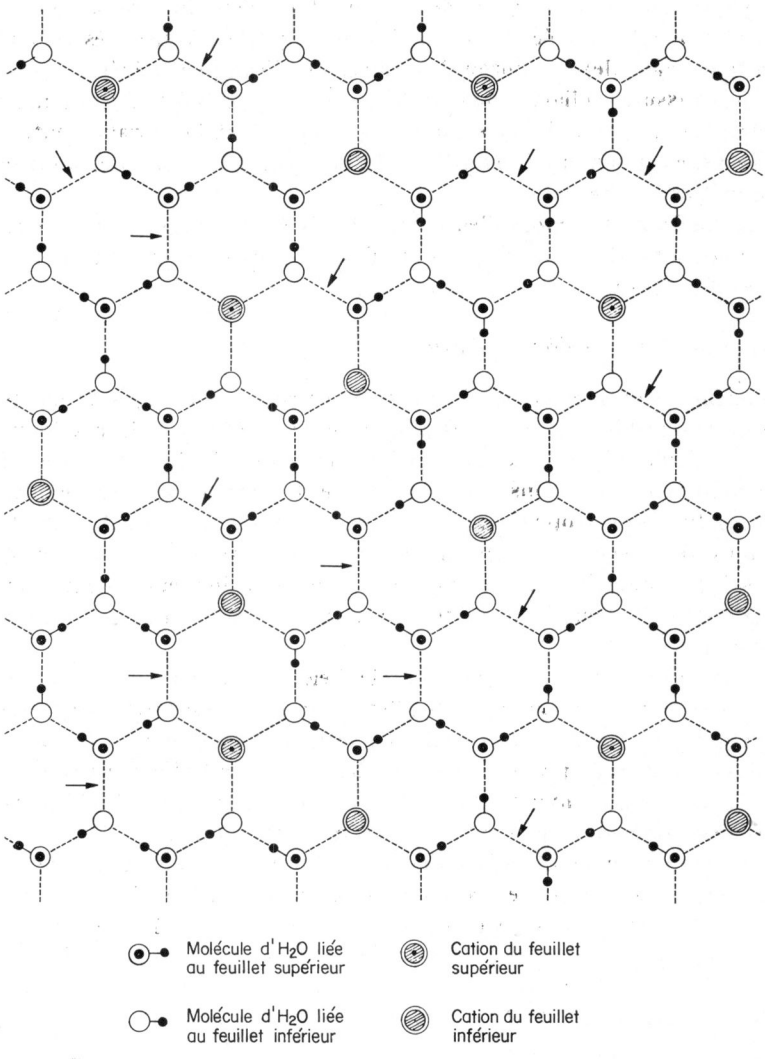


FIG. 45. — *Distribution des protons dans la monocouche*

2° *Cas des surfaces externes.*

La couche d'eau n'est plus liée qu'à un seul feuillet. Le bilan protons-liaisons est excédentaire (17 protons pour 14 liaisons H_2O—H_2O). Les propriétés de la monocouche en surface externe peuvent donc être très différentes de celles de la monocouche des espaces interfeuillets.

c) *Propriétés spécifiques du modèle de monocouche*

A la suite de l'exposé de quelques-unes des caractéristiques du modèle proposé, il est aisé de montrer que la structure de la couche d'eau décrite par ce modèle rend compte de l'ensemble des résultats expérimentaux exposés dans ce travail.

α) *Rotations moléculaires.*

En raison du « déficit » de protons qui caractérise la monocouche des espaces interfeuillets (fig. 45), certaines molécules d'eau peuvent occuper plusieurs positions équivalentes et passer de l'une à l'autre sans provoquer de perturbation dans la structure. C'est ainsi qu'un proton peut passer :

1° D'une liaison hydrogène entre deux molécules d'eau sur une liaison voisine libre, par rotation de la molécule d'eau autour de la liaison eau—feuillet (fig. 46 A)

2° D'une liaison eau—feuillet sur une liaison entre deux molécules d'eau (et réciproquement), par rotation de la molécule d'eau autour d'une liaison H_2O—H_2O ou H_2O—cation (fig. 46 B).

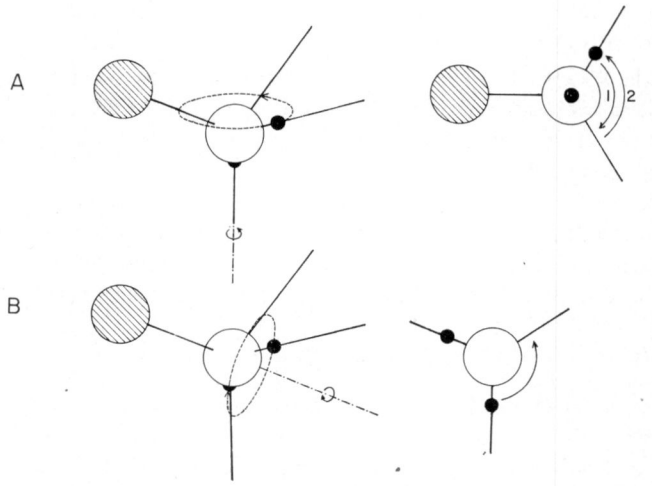


FIG. 46. — *Mouvements de rotation des molécules d'eau de la monocouche*

Ces deux types de rotation sont stériquement possibles et ne requièrent pas une énergie très élevée grâce aux liaisons libres.

Les molécules d'eau possèdent un moment dipolaire assez élevé (compris entre 2 et 3 DEBYE) l'application d'un champ électrique doit par conséquent provoquer leur orientation dans une direction préférentielle. L'utilisation d'un champ électrique alternatif de fréquence convenable doit donc donner lieu à une absorption dipolaire par rotation moléculaire.

Les énergies nécessaires correspondent à des ruptures et à des reformations de liaisons hydrogène ou de liaisons H_2O—cation.

— Dans le cas A, la rotation est limitée à 120° (le proton ne peut pas « passer » sur une liaison portant déjà un proton ou un cation). Cette rotation de 120° provoque, soit la rupture d'une liaison hydrogène et d'une liaison H_2O—cation, soit la rupture de deux liaisons hydrogène, et nécessite la reformation de ces deux liaisons.

— Dans le cas B, la rotation peut être de 360°. Une rotation limitée à 120° provoque, soit la rupture d'une liaison hydrogène et d'une liaison H_2O—feuillet (dont l'énergie est à coup sûr, compte tenu de la distance H_2O—OH, inférieure à celle d'une liaison hydrogène normale), soit la rupture de deux liaisons hydrogène, et nécessite la reformation de ces deux liaisons.

Au total, l'énergie mise en jeu peut être moins élevée dans le cas B que dans le cas A, et la faiblesse de la liaison H_2O—feuillet devrait favoriser les rotations du type B.

β) *Transferts de charges.*

En plus des phénomènes d'absorption par rotations moléculaires, la structure de la couche d'eau permet la manifestation de processus de conductivité.

1° Les cations (surtout les plus polarisants) doivent favoriser la tendance à l'échappement des protons des molécules d'eau qui leur sont directement liées. Cet effet peut provoquer un mécanisme de transfert de protons du type H_3O^+. La configuration de la couche d'eau des surfaces externes est particulièrement favorable à ce mécanisme grâce à l'« excès » de protons.

2° Dans la couche d'eau interfeuillets, la présence de liaisons sans protons est évidemment à rattacher aux défauts du type L de BJERRUM. Le transfert des protons peut être assuré par des rotations moléculaires analogues aux cas A et B décrits dans le paragraphe précédent.

Ces deux mécanismes correspondent à la définition qui a été donnée d'une conductivité « extrinsèque », ils peuvent donc rendre compte de la conductivité de basse température. La conductivité « intrinsèque » met en jeu les mêmes mécanismes, mais grâce à la création de nouveaux défauts par suite d'effets thermiques.

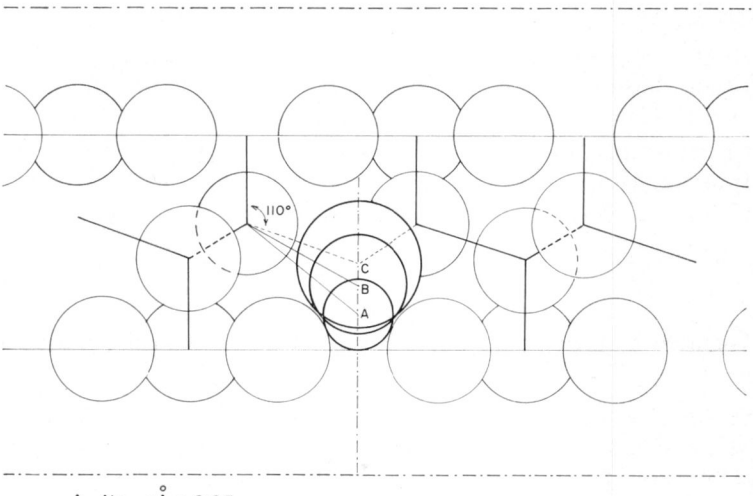
γ) *Rôle du cation. — Stabilité de la monocouche.*

Chaque cation est coordonné à trois molécules d'eau par l'intermédiaire d'une orbitale négative des oxygènes. La position du cation et l'énergie de la liaison eau—cation sont donc des facteurs déterminants dans la stabilité de structure de la couche d'eau.

La position du sodium a été déterminée avec précision (H. PEZERAT, J. MERING, 1958, voir fig. 43) dans le cas de la montmorillonite hydratée à une couche d'eau interfeuillets, et des considérations stériques peuvent fixer sans trop d'imprécision les positions du potassium et du césium. La position exacte du lithium est par contre inconnue.

La figure 47 montre sur une coupe perpendiculaire au plan du feuillet (cf. fig. 42) la position des cations Na, K et Cs, centrés sur l'axe d'une cavité hexagonale. Suivant la nature du cation, la direction de l'orbitale de l'oxygène assurant la liaison H_2O—cation est plus ou moins éloignée de la direction normale de cette orbitale dans une liaison H_2O—H_2O (110° de la perpendiculaire au plan du feuillet). Il doit en résulter des tensions qui peuvent être une cause d'instabilité de la monocouche.

La structure est cependant suffisamment rigide pour ne pas être perturbée lorsque la température atteint et dépasse 0°C puisqu'on n'observe pas alors de singularité des propriétés diélectriques.



A Na $r_{\text{Å}}$ = 0,95
B K $r_{\text{Å}}$ = 1,33
C Cs $r_{\text{Å}}$ = 1,69

FIG. 47. — *Position des cations par rapport au feuillet*

1° *Montmorillonite Cs.*

Le césium ne semble pas devoir provoquer de perturbations de la couche d'eau puisque l'orbitale de l'oxygène n'est pratiquement pas déformée. Cependant le grand diamètre du cation (3,38 Å) peut constituer par suite d'effets stériques, un facteur limitant pour certaines rotations des molécules d'eau. Le faible affinité du césium pour l'eau (tabl. 4, p. 195) doit aussi correspondre à une influence réduite du cation sur les protons voisins. Ces deux faits peuvent rendre compte de la très faible absorption dipolaire de la montmorillonite Cs, et de sa conductivité inférieure à celle qui est observée avec les autres cations (fig. 8, 9 et 26).

2° *Montmorillonite K.*

La taille du potassium est très voisine de celle de l'oxygène et son affinité pour l'eau est supérieure à celle du césium. La monocouche est très stable et le potassium ne constitue pas un obstacle aux mouvements des molécules d'eau ; il est par conséquent normal que les propriétés diélectriques caractéristiques de cette structure soient particulièrement marquées et persistantes dans un domaine étendu de teneurs en eau.

3° *Montmorillonite Na.*

L'affinité du sodium pour l'eau est très forte et l'orbitale de l'oxygène subit une déformation importante. Les tensions qui en résultent doivent affaiblir la structure et faciliter un passage rapide à un état d'hydratation plus élevé.

4° *Montmorillonite Li.*

La monocouche de la montmorillonite Li est discontinue et instable.

Les trois molécules d'eau qui entourent chaque cation ne sont pas liées à d'autres molécules d'eau, et sont donc toutes susceptibles de tourner aisément autour de la liaison cation—eau. Le nombre de dipôles influencés par le champ électrique peut être par conséquent beaucoup plus élevé que dans le cas des montmorillonites K et Na (l'absorption dipolaire est en effet plus forte pour la montmorillonite Li, fig. 28).

La structure étant discontinue, il n'existe pas, ou peu, de chaînes de transfert pour les protons, ce qui rend compte du fait que la conductivité de la montmorillonite Li est plus faible qu'avec les autres cations (fig. 8, 9 et 36).

2. Formation et caractères généraux de l'hydratation à deux couches

Étant donné le domaine d'hydratation choisi, c'est essentiellement la monocouche qui a été l'objet de cette étude, il est toutefois possible de formuler quelques remarques au sujet de la formation d'une deuxième couche d'eau interfeuillets, et au sujet des différences fondamentales qu'un ensemble de deux couches présente par rapport à la monocouche.

a) *Formation de la deuxième couche d'eau interfeuillets*

On peut tout d'abord essayer de superposer à la configuration de la première couche d'eau adsorbée, une deuxième couche identique, mais la structure obtenue porterait la distance interfeuillets à 16,5 Å, or on ne dispose que d'environ 15,5 Å.

Seul un retour aux paramètres réels du réseau de la glace permet de placer deux couches bâties sur ce modèle dans l'espacement disponible. Mais dans ce cas, il faut nécessairement modifier la nature des relations H_2O-feuillet et H_2O-cation, et il n'est plus possible d'associer les configurations des couches d'eau et du réseau de la montmorillonite.

L'éloignement des feuillets provoqué par la formation d'une deuxième couche d'eau, et l'accroissement de la quantité d'eau interposée entre eux doit provoquer d'importantes modifications des interactions entre les différents constituants du milieu. Dans ces conditions, il n'est pas surprenant que l'organisation de l'eau interfeuillets soit modifiée. Ce point de vue est confirmé par les observations de J. Escard et *al.* (1960) sur la montmorillonite Na à deux couches d'hydratation homogènes. Selon ces auteurs, les bandes de diffraction observées sur le minéral à deux couches ne montrent aucun changement par rapport à l'état anhydre ; les molécules d'eau n'apportent aucune contribution aux interférences et ne se conforment donc pas au réseau du minéral. La position du cation pourrait également être modifiée par le passage à l'hydratation à deux couches.

La formation de la deuxième couche semble donc bien nécessiter une modification profonde de la structure de la monocouche.

b) *Propriétés succinctes de l'état d'hydratation à deux couches*

La formation de la deuxième couche doit provoquer, en plus des modifications des relations eau-feuillet et eau-cation, des variations des distances intermoléculaires, et une redistribution des liaisons hydrogène. Il en résulte :

1° La disparition de l'absorption dipolaire du domaine des ondes kilométriques.

2° L'apparition d'un point de transition au voisinage de 0°C pour les conductivités et la manifestation d'un nouveau type de conductivité différent de ceux associés à la monocouche.

Dans le cas de la montmorillonite Cs, la deuxième couche d'eau interfeuillets ne se forme pas. L'eau s'accumule donc sur les surfaces externes des cristallites lorsque la teneur en eau croît. On peut voir cependant (fig. 10 à 13) que les propriétés diélectriques de cet échantillon sont alors comparables à celles des montmorillonites Li, Na et K pour les teneurs en eau supérieures à la monocouche. Il semble par conséquent, que les propriétés de l'eau interfeuillets lorsque la monocouche est dépassée, sont identiques à celles de l'eau recouvrant les surfaces externes.

3. Conclusion de la troisième partie

L'analyse des différents résultats expérimentaux obtenus a permis, après une courte étude critique, de proposer un modèle de configuration des molécules d'eau fixées par la montmorillonite sous forme d'une monocouche. L'accord entre les propriétés de ce modèle et les propriétés réelles de l'eau adsorbée est satisfaisant.

En ce qui concerne les états d'hydratation plus élevés que ceux qui correspondent à la monocouche, les limites de ce travail ne permettent pas d'apporter de nombreuses données. Il paraît toutefois certain que l'organisation des molécules d'eau y est très différente de celle de la première couche adsorbée.

Certains auteurs (voir par exemple A. G. Pickett, M. M. Lemcoe, 1959) ont déjà montré que la viscosité de l'eau au voisinage des surfaces d'argile est supérieure à celle de l'eau libre, et qu'elle décroît uniformément avec la distance. Cette description des phénomènes qui accompagnent la formation des couches d'eau successives reste cependant trop vague. La viscositè peut en effet présenter une variation continue, mais les résultats des expériences présentées ici montrent de véritables discontinuités de certaines propriétés de l'adsorbat. Ces discontinuités proviennent du fait que l'adsorption d'une couche supplémentaire modifie les propriétés de la totalité des couches adsorbées. De sorte que l'on n'observe pas simplement les modifications des propriétés de la nouvelle couche par rapport à la précédente, mais les propriétés du nouvel ensemble ainsi constitué. Bien entendu, l'effet des nouvelles couches peut s'atténuer à mesure que leur nombre total croît, mais ceci ne pourrait s'observer que dans un domaine d'hydratation différent de celui exploré dans ce travail.

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'adsorption de la vapeur d'eau sur les surfaces des cristallites de montmorillonite (surfaces externes et surfaces internes limitant les espaces interfeuillets) permet non seulement de caractériser le minéral, mais conditionne en outre certaines de ses plus importantes propriétés physico-chimiques, comme la mobilité et l'échangeabilité des cations, les processus de gonflement et de dispersion, etc. Cela suffirait en soi à faire de l'eau adsorbée un élément essentiel pour la connaissance précise du comportement de la montmorillonite, si l'on n'avait en plus montré que la présence d'eau adsorbée, même en quantité très faible, est indispensable au maintient de la composition du réseau.

Chercher à connaître la nature exacte des interactions entre l'argile et l'eau, et tenter de décrire l'organisation des molécules d'eau au niveau des surfaces du minéral, apparaît donc bien comme une démarche nécessaire pour atteindre ce qui détermine le comportement spécifique des argiles.

Les déterminations classiques telles que la diffraction des rayons X et les isothermes d'adsorption, n'ont pas fourni récemment de données assez originales pour permettre de perfectionner sensiblement les schémas de structure de l'eau adsorbée proposés dans les quinze dernières années. Les méthodes spectroscopiques ont, par contre, offert de nouvelles possibilités, et la très large contribution de la spectroscopie infrarouge doit être à ce propos signalée.

L'extension du domaine des longueurs d'ondes exploré permet de mettre en œuvre d'autres techniques spectroscopiques. La mesure des propriétés diélectriques en est un exemple. Celle-ci a l'avantage de pouvoir apporter simultanément des renseignements sur plusieurs processus. C'est ainsi qu'on peut détecter à la fois des phénomènes comme l'absorption MAXWELL-WAGNER, qui a pour origine l'hétérogénéité du milieu, ou comme l'absorption dipolaire, résultant des mouvements des dipôles associés en défauts de réseau, et des phénomènes de migration de porteurs de charges mettant au cause ou non des mécanismes coopératifs.

Au cours du présent travail, on a donc cherché à exploiter, d'une manière aussi précise que possible, les résultats globaux des mesures des propriétés diélectriques de poudres de montmorillonite saturées par divers cations alcalins, et soumises à des conditions physiques variées de température et d'hydratation. Les différents effets signalés plus haut ont pu être observés sur ces échantillons. L'interprétation des données recueillies a finalement conduit à proposer un schéma structural de l'eau adsorbée par la montmorillonite à l'état dit « monocouche ».

Les déterminations expérimentales et les hypothèses explicatives rendues nécessaires pour aboutir à ce résultat ont mis en relief la mobilité des porteurs de charges qui sont, dans les conditions choisies, des protons provenant des molécules

d'eau. La très grande mobilité de ces protons implique l'existence, au voisinage immédiat de la surface de l'argile, de champs perturbateurs assez intenses. Parmi les deux possibilités qui sont alors offertes quant à l'origine de ces derniers, le réseau lui-même ou le cation compensateur, il semble approprié de retenir la seconde qui est la seule à pouvoir rendre compte de la dépendance étroite qui existe entre les grandeurs diélectriques mesurées et la nature de l'ion échangeable.

La structure du film d'eau met à profit la concordance qu'on peut faire apparaître entre le réseau de la glace hexagonale et le réseau du plan superficiel des atomes d'oxygène de l'argile. L'espace interfeuillets peut alors être considéré comme un tout auquel participent de façon équivalente les deux faces cristallines qui le limitent, et les deux plans de molécules d'eau qui constituent en réalité la « monocouche ». Ce résultat corrobore pleinement les données de nature purement cristallographique qui avaient été déjà fournies par H. PEZERAT et J. MERING. En outre, l'impossibilité de doubler cette structure en épaisseur explique la modification complète de l'allure des résultats quand on passe au stade à deux couches d'eau.

Le rôle du cation est déterminant dans la structure de la monocouche, car il y participe à deux titres : à la fois comme particule intégrée à la couche d'eau et lui conférant ses propriétés caractéristiques et, comme espèce ionique dont la présence équilibre la charge nette du réseau de l'argile. Cette double appartenance dépend de l'ordre cristallin que l'on peut trouver dans le minéral. On peut toutefois se demander si elle n'impose pas en retour un type d'empilement déterminé aux feuillets de la montmorillonite.

Ces résultats ne peuvent être considérés comme probants que dans le domaine des faibles hydratations auquel nous nous sommes limité. Rien ne prouve qu'ils puissent être généralisés aux cas où la quantité d'eau adsorbée dépasse un certain seuil. La réponse à cette question ne peut être fournie que par d'autres recherches au cours desquelles il est assez probable que les conceptions de base devront être modifiées par suite de l'importance que prend la migration des ions échangeables ; ce qui entraîne la prise en considération d'effets déjà décrits à propos de systèmes colloïdaux comme les protéines.

Il n'en reste pas moins que, dans le cas des faibles hydratations, une spécificité d'interactions argile-eau se manifeste de façon si nette qu'on peut parler d'un véritable complexe, dont la stabilité est déterminante pour le comportement d'ensemble du minéral.

Reçu pour publication en janvier 1968.

SUMMARY

RESEARCH ON THE HYDRATATION OF MONTMORILLONITE :
DIELECTRIC PROPERTIES AND STRUCTURE OF THE WATER FILM
(THIRD PART)

A specific behaviour of montmorillonite consists in its adsorption of water vapour. Such behaviour depends mostly on the nature of the compensating cations and governs their exchangeability. To show clearly how this specific behaviour originates, it seems necessary to define the nature of the clay/water/cation interaction and the water-molecule arrangement at the mineral's surfaces.

Such investigations refer mainly to hydratation conditions corresponding to the formation of a single water layer in the inter-sheet voids of montmorillonites saturated by univalent cations.

The dielectric properties of clay/water systems involve manifold mechanisms, such as free-carrier conductivity, dipole absorption, Maxwell-Wagner effect. These mechanisms bring into action the surface properties of the solid, the configuration of the adsorbed film, the defects of the lattice structure and the state of ionization of the water. Hence, measurement of dielectric properties may provide data unobtainable with X rays.

Comparison of such measurements with those of the dielectric properties of hexagonal ice revealed clearly that both conductivity and dipole absorption of the water adsorbed on the montmorillonite are of the same nature.

Formation of the « single layer » shows the typical behaviour of the mineral. In fact, this « single layer » consists of water molecules split into two flat layers each of which is preferentially linked to a sheet of the montmorillonite. The compensating cations are directly associated with the water layer. Therefore, the « single layer » is in close interaction with the clay's lattice thus forming a real continuum, the stability of which wholly governs the behaviour of the mineral.

ZUSAMMENFASSUNG

UNTERSUCHUNGEN ÜBER DIE WASSERAUFNAHME DES MONTMORILLONITS : DIELEKTRISCHE EIGENSCHAFTEN UND STRUKTUR DES WASSERFILMS

Der Montmorillonit weist hinsichtlich der Adsorption des Wasserdampfes ein spezifisches Verhalten auf. Dieses Verhalten steht in enger Verbindung mit der Natur der ausgleichenden Kationen und bedingt die Austrauschfähigkeit derselben. Um die Ursache dieses spezifischen Verhaltens zu verdeutlichen, scheint es erforderlich, die Natur der Wechselwirkungen von Ton-Wasser-Kation, sowie die Stellung der Wassermoleküle auf den Mineraloberflächen zu bestimmen.

Diese Untersuchungen beziehen sich im wessentlichen auf die Wasseraufnahmeverhältnisse, die der Bildung einer einzigen Wasserschicht zwischen den durch einwertige Kationen gesättigten Montmorillonitblättchen entsprechen.

Die dielektrischen Eigenschaften der Ton-Wasser-Systeme beeinflussen zahlreiche Mechanismen : spezifischer Lertwert durch freie Träger, dipolare Absorption, Maxwell-Wagner Effekt. Diese Mechanismen lassen die Oberflächen-Eigenschaften des Festkörpers, die Gestalt des adsorbierten Films, die Fehler des Netzes, sowie die Wasserionisierung einwirken.

Die Messungen der dielektrischen Eigenschaften sind deshalb imstande, Angaben zu liefern, die nicht mittels Beugung von Röntgenstrahlen erhalten werden können.

Der Vergleich der Ergebnisse dieser Messungen mit denjenigen, die sich auf die dielektrischen Eigenschaften des normalen Eises beziehen, ermöglichte es, nachzuweisen, dass die eingesetzten Mechanismen, sowohl der spezifische Leitwert als auch die dipolare Absorption des auf Montmorillonit adsorbierten Wassers, von gleicher Natur sind.

Die Bildung der « Monoschicht » ist der Beweis für ein charakteristisches Verhalten des Minerals. Diese « Monoschicht » ist tatsächlich aus Wassermolekülen gebildet, die sich auf zwei flache Schichten verteilen, von denen jede vorzugsweise an ein Blättchen gebunden ist.

Die ausgleichenden Kationen sind in direkter Verbindung mit der Wasserschicht. Die « Monoschicht » steht also in engem Austauschverhältnis mit dem Tonnetz es handelt sich hier um einen tatsächlichen Komplex, dessen Stabilität das gesamte Verhalten des Minerals bestimmt.

РЕЗЮМЕ

Исследование гидратации монтмориллонита : диэлектрические свойства и структура водной пленки.

Ж. МАМИ.

Адсорбция водных паров дает представление о специфичности поведения монтмориллонита, находящимся в тесной связи с природой катионов-компенсаторов и обуславливающимся их обменной способнотью. Чтобы уточнить происхождение этого специфического поведения автор считал

необходимым попытаться определить природу взаимодействия глина — вода — катион и распределение молекул воды на уровне поверхности минерала.

Исследования эти относятся главным образом к гидратационным состояниям соответствующим образованию единичного водного пласта в меж-пластинковых пространствах монтмориллонитов насыщенных одновалентыми катионами.

Диэлектрические свойства систем глина — вода приводят в действие многочисленные механизмы : удельную проводимость свободных носителей, би-полярное поглощение, эффект Максвелла-Вагнера... Механизмы эти связаны в свою очередь со свойствами поверхности твердого вещества, формой адсорбированной пленки, недостатками сети и ионизационным состоянием воды. Измерения диэлектрических свойств могут значит доставить данные, которые невозможно получить при помощи диффракции рентгеновских лучей.

Сравнение результатов этих измерений с данными диэлектрических свойств нормального льда позволило выяснить что механизмы приведенные в действие и относящиеся как к удельным проводимостям, так и к би-полярному поглощению адсорбированной на монтмориллоните воды, одной и той-же природы.

Образование « монопласта » выявляет характерное поведение минерала. В действительности этот « монопласт » образуется из молекул воды состоящих из двух равных пластов, из которых каждый предпочтительно связан с одной из пластинок минерала. Катионы-компенсаторы прямо присоединены к водному пласту. « Монопласт », следовательно, находится в тесном взаимодействии с сетью глины и можно говорить о настоящем комплексе, устойчивость которого является решающей для общего поведения минерала.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ARNOULT R., SIXOU P., DANSAS P., 1965. Spectre hertzien d'absorption de diélectriques hétérogènes en couches ; polarisation interfaciale. *Rev. gén. Électr.*, **74**, 944-946.

AUTY R. P., COLE R. H., 1952. Dielectric properties of ice and solid D_2O. *J. chem. Phys.*, **20**, 1309-1314.

BARON A., 1966. *Contribution à l'étude diélectrique de l'eau adsorbée sur les argiles.* Thèse Fac. Sci. Rennes.

BARSHAD I., 1949. The nature of lattice expansion and its relation to hydration in montmorillonite and vermiculite. *Amer. Min.*, **34**, 675-684.

BERNAL J. D., FOWLER R. H., 1933. A theory of water and ionic solution, with particular reference to hydrogen and hydroxyl ions. *J. chem. Phys.*, **1** (8), 515-548.

BJERRUM N., 1952. Structure and properties of ice. *Science*, **115**, 385-390.

BOTTCHER C. J. F., 1952. *Theory of electric polarisation.* Elsevier, Amsterdam.

BRECKENRIDGE R. G., 1948. Low frequency dispersion in ionic crystals. *J. chem. Phys.*, **16**, 959-967.

BROWN G., MAC EWAN D. M. C., 1949. The interpretation of X-Ray diagramms of soil clays. II. Structures with random interstratification. *J. Soil. Sci.*, **1** (2), 239-253.

BROWN G., 1961. *The X-Ray identifications and crystal structures of clay minerals*, 544 p. Mineralogical Society., London.

BRUNAUER S., EMMETT P. H., TELLER E., 1938. Adsorption of gases in multimolecular layers. *J. amer. chem. Soc.*, **60**, 309-319.

BRUNAUER S., 1945. *Physical adsorption. The adsorption of gases and vapor.* 511 p. Princeton Univ. Press.

CALVET R., CHAUSSIDON J., CLOOS P., de KIMPE C., FRIPIAT J. J., GASTUCHE M. C., HELSEN J., JELLI A., LEONARD A., PONCELET G., UYTTERHOEVEN J., 1964. Protons de constitution, protons libres et eau adsorbée. *Bull. Gr. fr. Argiles*, **14** (9), 59-98.

CALVET R., 1967. Diffusion du Na^{23} dans la montmorillonite aux faibles états d'hydratation. *Bull. Gr. fr. Argiles*, **14** (1), 91-99.

CHAPOTON A., WACRENIER J. M., 1967. *Interprétation des spectres diélectriques à large bande de fréquence des corps poreux. Influence des surfaces.* Fac. Sci. Lille. Communication au colloque sur les diélectriques. Lannion.

COLE K. S., COLE R. H., 1941. Dispersion and absorption in dielectrics. *J. Chem. Phys.*, **9**, 341-351.

CONWAY B. E., O'BOCKRIS J., HEDDA LINTON., 1956. Proton conductance and the existence of H_3O^+ ion. *J. Chem. Phys.*, **24** (4), 834-850.

CREMERS A., 1964. *Electrical conductivity of clay gels.* Thèse Univ. Cath. Louvain.

DANSAS P., SIXOU P., ARNOULT R., 1966. Utilisation de l'effet Maxwell-Wagner pour l'étude de diélectriques présentant des pertes par relaxation dipolaire et une forte conductivité. *Communication Colloque A. M. P. E. R. E.* Ljubljana.

DEBYE P., 1929. *Polar molecules.* 172 p., Dover. Publ., New York.

DUCROS P., DUPONT M., 1964. Étude par R. M. N. de l'évolution thermique aux basses températures de l'eau d'hydratation de la montmorillonite. *Bull. Gr. fr. Argiles*, **14** (9), 99-104.

EIGEN M., de MAEYER L., 1958. Self dissociation and protonic charge transport in water and ice. *Proc. r. Soc. A*, **247**, 505-533.

ESCARD J., 1950. The effect of progressive dehydratation on the area of surface of montmorillonites. *J. chem. Phys.*, **64**, 1234-1241.

ESCARD-LONGUET J., MERING J., BRINDLEY G. W., 1960. Étude des profils des bandes de diffraction dans la montmorillonite. Influence de l'hydratation et de la nature des cations échangeables. *Intern. Geol. Congr. XXI Session, Norden*, Part **24**, 17-27.

EYRING H., 1936. Viscosity, plasticity and diffusion as examples of absolute reaction rates. *J. chem. Phys.*, **4**, 283-291.

FORSLIND E., 1948. The crystal structure and water absorption of the clay minerals. *Trans. 1st. internation. Ceram. Congr.*, 98-110.

FREYMANN M., FREYMANN R., 1951. Influence de la température sur l'absorption ultrahertzienne de l'eau de cristallisation et de l'eau d'adsorption. *C. R. Acad. Sci.*, **232**, 1096-1098.

FREYMANN M., FREYMANN R., 1951. Absorption dans l'ultrahertzien et liaison hydroxyle. Eau de cristallisation et eau d'adsorption. *C. R. Acad. Sci.*, **232**, 401-403.

FREYMANN R., 1953. Absorption dans le spectre hertzien de l'eau libre et de l'eau liée. *J. Chim. Phys.*, **50**, Colloque C. N. R. S., nº 53, C 28-C 34.

FREYMANN M., FREYMANN R., 1954. Spectre hertzien et structure des solides. II. Absorption Debye de l'eau libre et de l'eau liée. *J. Phys. Rad.*, **15**, 165-175.

FREYMANN R., SOUTIF M., 1960. *La spectroscopie hertzienne appliquée à la chimie.* 31-79, Dunod, Paris.

FRIPIAT J. J., CHAUSSIDON J., TOUILLAUX R., 1960. Study of dehydration of montmorillonite and vermiculite by infrared spectroscopy. *J. phys. Chem.*, **64**, 1234-1241.

FRIPIAT J. J., ROUXHET P., JACOBS H., 1965. Proton delocalization in micas. *Amer. Min.*, **50**, 1937-1958.

FUOSS R. M., KIRKWOOD J. G., 1941. Electrical properties of solids. *J. amer. chem. Soc.*, **63**, 385-394.

GIESEKING J. E., 1949. The clay minerals in soils. *Ad. Agron.*, **1**, 159-202.

GLAESER R., 1953. *Complexes organo-argileux et rôle des cations échangeables*, 68 p. Thèse Fac. Sci. Paris.

GOLDSMITH B. J., MUIR J., 1960. Surface ion effects in the dielectric properties of adsorbed water films. *Trans. Far. Soc.*, **56**, 1656-1662.

GOSAR P., 1963. On the mobility of H_3O^+ ion in ice crystals. *Il nuovo cimento*, **10** (30), 931-946.

GRANICHER H., JACCARD C., SHERRER P., STEINEMANN A., 1957. Dielectric relaxation and the electrical conductivity of ice crystals. *Disc. Far. Soc.*, **23**, 50-62.

GRANT E. H., BUCHANAN T. J., COOK H. F., 1957. Dielectric behaviour of water at microwave frequencies. *J. chem. Phys.*, **26**, 156-161.

GRIM R. E., 1953. *In clay mineralogy.*, chap. **8**, 161-189. Mc Graw Hill, New York.

GROSVALD G., 1966. *Contribution à l'étude du système praséodyme-oxygène par la méthode diélectrique.* Thèse Fac. Sci. Rennes.

HAMON B. V., 1953. Maxwell-Wagner loss an absorption currents in dielectrics. *Austral. J. Phys.*, **16**, 304-315.

HASTED J. B., 1961. *The dielectric properties of water. In Progress in dielectrics.* Vol. 3, p. 101-149. Heywood and Co., London.

HENDRICKS S. B., JEFFERSON M. E., 1938. Structure of kaolin and talc-pyrophyllite hydrates and their bearing on water sorption of clays. *Amer. Min.*, **23**, 863-875.

HENDRICKS S. B., TELLER R., 1942. X-Ray interference in partially ordered layer lattices. *J. chem Phys.*, **10**, 147-167.

HENDRICKS S. B., 1945. Base exchange in the crystalline silicates. *Industr. eng. Chem.*, **37**, 625-630.

HUGGINS C. M., SHARBAUGH A. H., 1963. Dielectric properties of some powdered organic semiconductors. *J. chem. Phys.*, **38** (2), 393-397.

JACCARD C., 1965. Mechanism of the electrical conductivity in ice. *Ann. N. Y. Acad. of Sci.*, **125**, 390-400.

JELLI A., PONCELET G., 1966. État du film d'eau adsorbée par des montmorillonites. Application de la thermodynamique statistique à l'étude des phénomènes d'adsorption. *Bull. Gr. fr. Argiles*, **17** (12), 39-51.

JONAS E. C., BROWN T. E., 1959. Analysis of interlayer mixtures of three clay mineral types by X-Ray diffraction. *J. sediment. Petrol.*, **29** (1), 77-86.

JOST W., 1960. *Diffusion in solids, liquids, gases.*, 558 p. Academic Press, New York.

KOPP M., 1964. Some physics titles on ice. *Progr. Rept. Dept. Physics. Univ. Pittsburgh*, nº 4, 22 p.

KOPP M., 1964. On the dielectric behaviour of ice and water. *Progr. Rept. Dept. Physics. Univ. Pittsburgh*, nº 2, 36 p.

LAJZEROWICZ J., 1963. *Étude de l'eau adsorbée sur des cristaux de LiF, par des mesures diélectriques.* Thèse Fac. Sci. Grenoble.

LAJZEROWICZ J., HUMBERT J., 1963. Anomalie diélectrique de l'eau adsorbée à la surface des cristaux ioniques. *Proc. Coll. A. M. P. E. R. E.*, **12**, 380-383.

LE BOT J., LE MONTAGNER S., 1961. Étude des propriétés diélectriques en ondes centimétriques de l'eau fixée sur les gels de silice. *C. R. Acad. Sci.*, **233**, 862-863.

LE BOT J., LE MONTAGNER S., 1955. La méthode diélectrique, nouveau procédé d'étude de l'adsorption de l'eau. *J. Phys. Rad.*, **16**, 163-164.

LEBRUN A., LIEBAERT R., FONTAINE J., RISBOURG A., 1963. Sur l'existence dans les gels de silice et les zéolites, de nombreux domaines d'absorption diélectrique aux fréquences hertziennes. *C. R. Acad. Sci.*, **256**, 5334-5336.

MACEY H. H., 1942. Clay-water relationship and the internal mechanism of drying. *Trans. Ceram. Soc.*, **41**, 73-121.

MAC DONALD J. R., 1953. Theory of a. c. space charge polarization effects in photoconductors, semiconductors and electrolytes. *Phys. Rev.*, **92**, 4-17.

MAC EWAN D. M. C., 1956. Fourier transform methods. I. A direct method of analysing interstratified mixtures. *Kolloidszchr.*, **149**, 96-108.

MAMY J., 1965. Étude des propriétés diélectriques de l'eau libre et de l'eau adsorbée. *Ann. agron.*, **16** (1), 91-106.

MAMY J., CHAUSSIDON J., 1966. Propriétés diélectriques de la montmorillonite aux basses hydratations. *Proc. internation. Clay Conf.*, **1**, 375-380. Jérusalem.

MAMY J., CHAUSSIDON J., 1966. Conductivité de la montmorillonite aux basses hydratations et aux basses températures. *Bull. Gr. fr. Argiles*, **18** (13), 41-47.

MAMY J., CHAUSSIDON J., 1967. Étude de l'absorption dipolaire à basse température de l'eau adsorbée sur la montmorillonite. *Bull. Gr. fr. Argiles*, **19** (1), 101-186.

MATHIESON A. MC L., WALKER G. F., 1954. Structure of Mg vermiculite. *Amer. Min.*, **39**, 231-255.

MERING J., 1949. X-Ray diffraction in disordered layer structures. *Acta Cryst.*, **2**, 371-377.

MERING J., GLAESER R., 1954. Sur le rôle de la valence des cations échangeables dans la montmorillonite. *Bull. Soc. fr. Min. Crist.*, **77**, 519-530.

MERING J., 1961. In Colloque internation. C. N. R. S. sur la synthèse et la genèse des argiles, p. 184-185 et 190.

MERING J., 1964. Gonflement, dispersion et hydratation des argiles. *Bull. Gr. fr. Argiles*, **14** (9), 115-123.

MOONEY R. W., KEENAN A. G., WOOD L. A., 1952. Adsorption of water vapor by montmorillonite. *J. amer. chem. Soc.*, **74** (6), 1367-1374.

MORTLAND M. M., FRIPIAT J. J., CHAUSSIDON J., UYTTERHOEVEN J., 1963. Interaction between ammonia and the expanding lattices of montmorillonite and vermiculite. *J. phys. Chem.*, **67**, 248-258.

MOTT N. F., GURNEY R. W., 1940. *Electronic processes in ionic crystals.*, 275 p., Dover. Publ. New York.

MUIR J., 1954. Dielectric loss in water film adsorbed by some silicate clay minerals. *Trans. Far. Soc.*, **50**, 249-254.

OBERLIN A., MERING J., 1962. Observations en microcospie et micro-diffraction électroniques sur la montmorillonite Na. *J. Microscopie*, **1**, 107-120.

OSTER J. D., LOW P. F., 1963. Activation energy for ion movement in thin water films on montmorillonite. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **27**, 369-373.

PEDRO G., 1965. Classification des minéraux argileux. *Ann. agron.*, **16**, nº hors-série 1, 108 p.

PEZERAT H., MERING J., 1958. Détection des cations échangeables de la montmorillonite par l'emploi des séries-différences. *Bull. Gr. fr., Argiles*, **10**, 25-26.

PEZERAT H., 1967. Recherches sur la position des cations échangeables et de l'eau dans les montmorillonites. *C. R. Acad. Sci.*, **265**, 529-532.

PICKETT A. G., LEMCOE M. M., 1959. An investigation of shear strength of the clay water system by radio-frequency spectroscopy. *J. Geoph. Res.*, **64**, 1579-1586.

PONCELET G., 1964. *Etude de l'eau adsorbée par les montmorillonites par des mesures d'entropie et de conductivité électrique.* Thèse, Univ. Cath. Louvain.

ROLLAND M. T., BERNARD R., 1951. Absorption dans le domaine des ondes kilométriques de l'eau adsorbée. *C. R. Acad. Sci*, **232**, 1098-1099.

SERRATOSA J. M., BRADLEY W. F., 1958. Determination of the orientation of OH bond axes in layer silicates by Infrared spectroscopy. *J. phys. Chem.*, **62**, 1164-1167.

SILLARS R. W., 1937. The properties of a dielectric containing semi-conducting particles of various shapes. *J. Inst. Electr. Engin.*, **80**, 378-394.

SMEKAL A., 1927. Conduction of electricity and dielectric strength of insulating ion crystals. *Z. Techn. Physik.*, **8**, 561-586.

VEDDER W., MCDONALD R. S., 1963. Vibrations of OH ions in muscovite. *J. chem. Phys.*, **38** (7), 1583-1590.

VON HIPPEL A. R., 1961. *Les diélectriques et leurs applications*, 439 p. Dunod, Paris.

WAGNER K. W., 1913. Zur Theorie der unvolkommen Dielektrika. *Ann. der. Phys.*, **40** (4), 817-855.

WAGNER K. W., 1914. Erklärung der dielektrischen Nachwirkungs vorgänge auf Grund Maxwellscher Vorstellungen. *Arch. Elekctrotech.*, **9**, 371-387.

WEILER R., 1966. *Conductivité de surface et propriétés diélectriques des gels de montmorillonite.* Thèse Univ. Cath. Louvain.

WIT C. T. DE, ARENS P. L., 1950. Moisture content and density of some clay minerals and some remarks on the hydration pattern of clay. *Trans. 4th internation. Congr. Soil. Sci.*, **2**, 59-62.

Ann. agron., 1968, **19** (3), 293-347.

ÉTUDES SUR L'ÉVOLUTION GÉOCHIMIQUE DE GELS ALUMINOSILICIQUES ET LA FORMATION DES HYDROXYDES D'ALUMINIUM EN CONDITIONS DE LIBRE DRAINAGE (1)

G. PÉDRO et J.-C. LUBIN

Laboratoire des Sols,
Station centrale d'agronomie,
Centre national de Recherches agronomiques, 78 - Versailles
Institut national de la Recherche agronomique

SOMMAIRE

Une série de gels aluminosiliciques artificiels et de composition variée ont été soumis à divers traitements en laboratoire (lessivage-macération), afin de préciser la nature de leur évolution et, en même temps, de la comparer à celle engendrée antérieurement lors des études effectuées en présence de roches cristallines.

Les résultats obtenus au cours des différents essais conduisent ainsi à faire ressortir le rôle fondamental du facteur « lessivage » au cours des processus d'altération superficielle, à analyser l'influence des caractéristiques des matériaux (constitution et nature des gels mixtes Si-Al) vis-à-vis des phénomènes d'hydrolyse, enfin à indiquer les conditions de formation des deux principaux hydrates d'aluminium : boehmite et gibbsite lors d'une évolution en milieu convenablement drainé.

INTRODUCTION

La technique du lessivage continu à l'eau en extracteur Soxhlet s'est révélée, depuis quelque temps, comme étant bien adaptée aux recherches de pédologie expérimentale et plus spécialement à l'examen des phénomènes d'évolution cristallochimique engendrés dans les conditions habituelles de la surface du globe (G. PÉDRO, 1964).

C'est ainsi que l'un de nous a pu aborder l'étude des processus d'altération mis en jeu à partir de roches cristallines (granite, basalte) sous l'action d'un drainage chaud et abondant et reproduire en particulier, au laboratoire, un phénomène de

(1) Ce travail constitue le prolongement d'une thèse de doctorat 3e cycle de Géodynamique externe (Pédologie-Géochimie) soutenue à la Faculté des Sciences de Paris, par J.-C. LUBIN, le 2 mars 1967.

même type que la ferrallitisation. En effet, l'évolution des diverses roches en présence d'un lessivage continu à l'eau s'est traduite, dans les expériences en question, par une intense élimination de la silice et par une accumulation quasi totale de l'aluminium qui s'est individualisé, *in situ*, sous forme d'hydroxydes libres et bien cristallisés (boehmite et gibbsite).

Toutefois, comme de tels essais ont été réalisés à partir de roches, c'est-à-dire de matériaux complexes et constitués de plusieurs minéraux, on pouvait se demander si les résultats obtenus avaient bien une portée générale et s'ils ne dépendaient pas, entre autres, de la structure originelle des matériaux de départ. C'est ce qui nous a conduit à entreprendre une étude du même genre, mais dans un cas plus simple, en partant par exemple de « gels aluminosiliciques » *amorphes* et de composition aussi diverse que possible.

***

De tels composés amorphes existent toujours à la surface du globe, en plus ou moins grande abondance, dans les diverses formations d'altération ; mais ce sont surtout les constituants essentiels et, la plupart du temps, uniques des sols dérivés de cendres volcaniques (allophanes des andosols par exemple).

Ils correspondent à des édifices sans structure périodique, dont la composition est relativement variable (le rapport SiO_2/Al_2O_3 oscille en général entre 0,7 et 2,5 ; — C. S. Ross et P. F. Kerr, 1934 ; F. V. Chukrov et *al.*, 1964 ; une bibliographie détaillée est donnée par B. D. Mitchell et *al.*, 1964) et qui contiennent, à la fois, de l'aluminium sous forme tétracoordonnée et hexacoordonnée (T. Egawa, 1964).

Malheureusement, comme il est difficile de se procurer de tels matériaux et de les extraire sélectivement en quantité suffisante pour permettre une étude de leur évolution par voie expérimentale, nous avons été amenés à partir de gels aluminosiliciques artificiels, obtenus par coprécipitation de silicate de soude et de sel d'aluminium (nitrate ou chlorure).

Ainsi l'étude envisagée a pour but essentiel de préciser le comportement de gels aluminosiliciques lorsqu'ils sont soumis à l'action d'un lessivage continu et de déterminer le rôle que peut jouer la structure du matériel de départ, ou mieux son état d'organisation ou de désorganisation, dans l'ensemble des problèmes relatifs à la vitesse des phénomènes de transformation, aux mécanismes de l'évolution et enfin au type géochimique de l'altération.

I. — CADRE GÉNÉRAL DES RECHERCHES

A. — Données sur les gels de départ

1. *Modes de préparation*

Les différents gels, qui doivent avoir au départ une teneur en SiO_2 et Al_2O_3 assez variée ($k_i = SiO_2/Al_2O_3$ mol = 1 à 6), ont tous été préparés par coprécipitation, en mélangeant du silicate de sodium et une solution de sel d'aluminium.

Mais aujourd'hui on sait notamment d'après la règle de W. Lowenstein (1954), les données de R. K. Iler (1959) et les résultats expérimentaux de J.-J. Fripiat et H. Bosmans (1958), C. de Kimpe et *al.* (1961), A. Leonard et *al.* (1964) etc., que

le pourcentage en aluminium tétraédrique dans un gel aluminosilicique croît régulièrement en fonction de sa teneur en SiO_2 et en même temps de la teneur en cations basiques du milieu de préparation.

Aussi, pour tenter d'obtenir une certaine quantité d'alumine hexacoordonnée dans les différents produits et en particulier dans les gels riches en SiO_2, nous avons été amenés à les préparer en milieu relativement acide suivant la technique de J.-J. FRIPIAT. De ce fait, la valeur de 4 a été choisie comme pH de fin de précipitation. D'où les modalités de préparations :

1°) c'est le silicate de sodium qui est toujours versé dans la solution du sel d'aluminium (chlorure ou nitrate) ;

TABLEAU I

Gels	Sels	Concentrations
A	SiO_3Na_2 $(NO_3)_3Al$	M M
B	SiO_3Na_2 $(NO_3)_3Al$	3 M M(+ NO_3H q. s.)
C	SiO_3Na_2 Cl_3Al	M(+ NaOH q. s.) 2 M
D	SiO_3Na_2 Cl_3Al	M(+ NaOH q. s.) M

TABLEAU 2

Milieu de préparation	Données Si-Al				Données X^--Na^+			pH (2)	
	concentrations en valeurs molaires		[Si]	SiO_2	concentrations en valeurs molaires		[X^-]	fin de précipitation	d'équilibre au sein de la solution (mesuré après quelques heures)
	SiO_2	Al_2O_3	[Al]	Al_2O_3	[Na^+]	[X^-]	[Na^+]		
A	1	0,5	1	2	2	3	1,5	3,2	3,5
B	3	0,5	3	6	3	1	0,33	3,9	4,5
C	1	1	0,5	1	8	3	0,37	3,5	6,4
D	1	0,5	1	2	3	3	1	4,3	4,5

(2) Il convient de signaler la tendance à la dispersion de A et D (surnageant trouble), tandis que B et C se sont déposés aisément (surnageant clair au bout de quelques heures).

2°) selon les quantités mises en présence pour obtenir des gels de composition différente, il a fallu calculer, *avant de procéder au mélange*, les quantités d'acide (NO_3H ou ClH) à ajouter au sel d'aluminium, ou de base (NaOH) à verser dans le silicate de soude, pour qu'à la fin de l'opération, le pH soit effectivement voisin de 4.

Quatre types de gel ont été ainsi préparés :

— A et B, par mélange de nitrate d'aluminium avec une solution de SiO_3Na_2 ;
— C et D, à partir de chlorure d'aluminium et de silicate de sodium.

Les quantités des différents réactifs mis en présence au départ sont indiquées dans le tableau 1 ; d'où l'évaluation immédiate des rapports de concentration : Si/Al (ou SiO_2/Al_2O_3) d'une part et Anions (NO_3^- ou Cl^-)/Cations (Na^+) d'autre part, *au sein du milieu de préparation.*

Les valeurs obtenues sont rassemblées dans le tableau 2, qui montre ainsi que, pour des pH voisins de l'ordre de 3 à 4, les gels A et D se sont individualisés dans un milieu où la concentration en Cl^- ou NO_3^- est supérieure (ou au moins égale) à celle des cations (micelles positives), alors que les composés B et C ont été engendrés dans une solution où la concentration en Na est nettement plus élevée que celle des anions (micelles négatives).

Les gels obtenus sont alors abandonnés à la décantation pendant quelques heures ; ils sont ensuite lavés à l'eau chaude et centrifugés à plusieurs reprises de façon à éliminer au mieux les anions et le sodium en excès. Enfin, ils sont mis à dessécher d'abord au bain de sable, puis à l'étuve à 105°C. Ils se présentent alors comme des xérogels c'est-à-dire sous forme d'une masse cohérente et poreuse (tabl. 3), qui a pu être découpée en fragments de 0,5 à 1 cm de diamètre.

2. *Caractérisation et composition des matériaux*

L'étude des matériaux obtenus, à l'aide des méthodes classiques de la minéralogie des argiles, montre tout d'abord que l'on a affaire à des substances amorphes.

La diffraction des rayons X ne conduit en effet à aucune réflexion de Bragg, ce qui est la caractéristique d'un agencement non périodique des polyèdres de constitution (cf. par exemple fig. 16, pour les matériaux A, B et C p. 327).

Les courbes de déshydratation (fig. 1) réalisées par thermogravimétrie indiquent une perte de poids totale de 18 à 28 p. 100 environ ; celle-ci, qui est graduelle et sans flexure prononcée, se termine toujours vers 5 à 600°C ; notons également qu'elle est d'autant plus faible que le gel est plus siliceux.

Les courbes d'analyse thermique différentielle (cf. fig. 7, 8, 9 et 10 p. 318 et suivantes) sont essentiellement caractérisées par un large crochet endothermique de départ dont le maximum se produit autour de 150°C ; il peut être suivi toutefois, pour certains matériaux (gels les plus alumineux), par un pic exothermique vers 900°C qui correspond classiquement à une réaction de recristallisation.

Enfin, la surface totale, mesurée par le procédé B. E. T. (adsorption d'azote à basse température) conduit à des valeurs assez grandes, supérieures à 200 m^2/gramme.

Toutes ces caractéristiques sont bien celles de matériaux amorphes et concordent d'ailleurs avec les données classiques sur les allophanes naturelles (K. S. Birrel et M. Fieldes, 1952 ; S. Aomine *et al.*, 1955 ; F. V. Chukrov, 1964).

L'analyse chimique des matériaux, qui portait sur les éléments suivants : silice,

alumine, sodium et eau de constitution (les anions n'ont pas été dosés), a donné les résultats consignés dans le tableau 3. On constate ainsi que, dans certains cas, en particulier pour A, la composition obtenue est légèrement différente de celle prévue

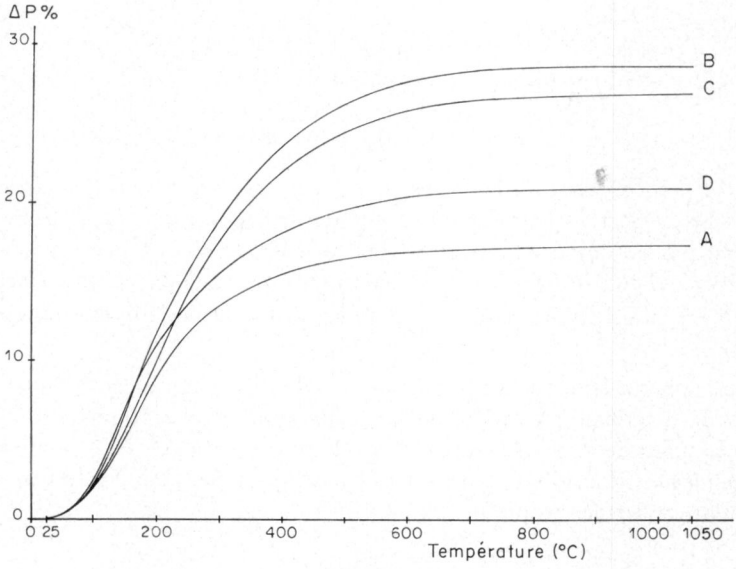


FIG. 1. — *Courbes thermopondérales des gels de départ*

TABLEAU 3

Types de gels	A	B	C	D
SiO_2	55,0	58,6	24,7	36,9
Al_2O_3	20,9	19.15	43,3	34,1
Na_2O	1,65	4,60	4,15	1,40
Perte au feu (H_2O)	21,0	17,2	28,2	27,0
Total	98,55	99,55	100,75	99,40
Ki = SiO_2/Al_2O_3	4,5	5,2	0,97	1,84
Al^{VI} (%)	68,5	100	25	54,5
Al^{IV} (%)	31,5	0	75	45,5
Capacité d'échange de bases (BEC) en méq/100 g	45 ± 5	58 ± 5	11 ± 2	60 ± 5
Surface spécifique en m^2/g (BET)	221	247	235	non dét.
Porosité (%)	53,2	62,8	32,0	non dét.
pH après lavage	3,9	6,2	6,7	4,8

au départ ; ceci est dû simplement au fait que, le pH des eaux de lavage étant resté très faible, une quantité non négligeable d'aluminium a pu être éliminée au cours des lavages répétés par centrifugation.

Finalement, les gels se répartissent tout d'abord en deux groupes suivant leur *contenu aluminosilicique* :

$$\begin{array}{cc} \text{Ki} > 4 & \left\{ \begin{array}{l} \text{A(4,5)} \\ \text{B(5,2)} \end{array} \right. \\ \text{(groupe hypersiliceux)} & \\ \text{Ki} < 2 & \left\{ \begin{array}{l} \text{C(1,0)} \\ \text{D(1,8)} \end{array} \right. \\ \text{(groupe hyposiliceux)} & \end{array}$$

Mais, du point de vue de leurs *teneurs en cations basiques*, on remarque que la quantité de Na_2O est relativement élevée (de l'ordre de 5 p. 100) dans le cas des gels B et C alors que les matériaux A et D sont peu alcalins (teneur en $Na_2O < 1{,}7$) ; or ceci correspond tout à fait aux caractéristiques des milieux de préparation :

$[X^-]/[Na^+]$ inférieur à 1 dans le premier cas et supérieur à 1 dans le second (cf. tabl. 2).

On peut donc considérer la première série (B et C) comme « cationique » (charge négative) et la deuxième (A et D) comme « anionique » (charge positive).

Ainsi, du point de vue de la composition chimique, les 4 gels A, B, C et D peuvent être groupés *deux à deux* d'une part suivant le rapport SiO_2/Al_2O_3, d'autre part suivant la teneur en cations (tabl. 4).

TABLEAU 4

$\frac{Si}{Al}$ ↓ $\quad \frac{[X^-]}{[Na^+]}$ →	série cationique pH d'équilibre après lavage $\geqslant 6$ $[X^-] < [Na^+]$ $Na_2O > 4$ %	série anionique pH d'équilibre après lavage < 5 $[X^-] > [Na^+]$ $Na_2O < 2$ %
Groupe hypersiliceux $\frac{Si}{Al} \geqslant 2$	B	A
Groupe hyposiliceux $\frac{Si}{Al} \leqslant 1$	C	D

Enfin les gels ont pu être caractérisés par deux données complémentaires :

— du côté de l'état de coordinence de l'aluminium tout d'abord, les valeurs correspondant aux teneurs respectives en Al^{IV} et Al^{VI} ont été obtenues à partir de mesures en fluorescence X, en utilisant la méthode de E. WHITE, H. MAC KINSTRY et T. F. BATES (1958) ; elles montrent ainsi, comme cela avait été établi par C. de KIMPE et *al.* (1961), que la proportion d'Al^{IV} est d'autant plus importante que le gel est plus siliceux (fig. 2) ;

— d'un autre côté, les capacités d'échange de cations (BEC) ont été déterminées

par la méthode à l'acétate d'ammonium à pH 7 ; elles sont assez variables d'un gel à l'autre (11 à 60 méq/100 g non calcinés), mais paraissent bien en corrélation avec la teneur en aluminium tétraédrique (fig. 3), ce qui confirme les résultats antérieurs de J.-J. FRIPIAT (1960).

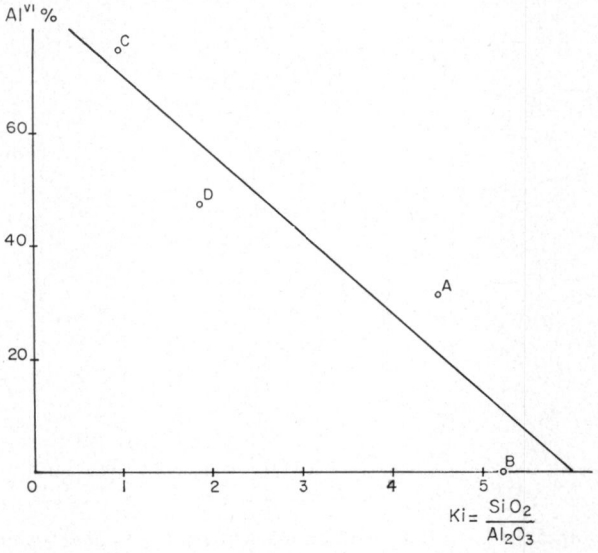


FIG. 2. — *Variation de la teneur en Al hexacoordonné en fonction du rapport* SiO/Al_2O_3

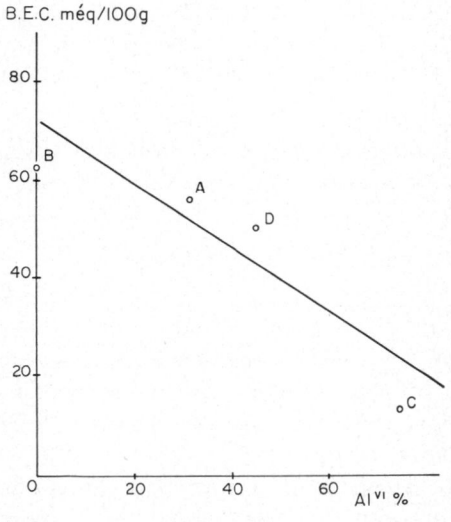


FIG. 3. — *Relation entre la teneur en Al hexacoordonné et la capacité d'échange des matériaux*

3. *Essai sur la constitution cristallochimique*

En tenant compte des données de l'analyse chimique relatives à la teneur globale en SiO_2 et Al_2O_3 dans les différents gels et des mesures apportées par la fluores-

cence X en ce qui concerne la distribution de l'aluminium dans les 2 types de polyèdres d'anions, il est aisé de préciser la nature cristallochimique des 4 matériaux de départ. En effet, si l'on considère que chaque Si ou Al^{IV} est le centre d'un tétraèdre, on peut calculer le nombre total de polyèdres d'anions et déterminer ainsi la proportion de chacun dans les différents gels. C'est ce qui a été réalisé ici, comme l'indique le tableau 5.

TABLEAU 5

Gels	Tétraèdres (%)			Octaèdres (%)
	Si	Al^{IV}	Tétraèdres	Al^{VI}
A	68	22	90	10
B	72	28	100	0
C	33	17	50	59
D	48	28	76	24

Finalement, en dehors de B, qui est exclusivement de type *tétraédrique* (Te = 100) les 3 autres gels sont *mixtes*, c'est-à-dire de type *tétraédroctaédrique* avec la constitution globale suivante :

A ..... [Te] 90, [Oc] 10.
C ..... [Te] 50, [Oc] 50.
D ..... [Te] 76, [Oc] 24.

B. — Conditions de l'évolution expérimentale : les divers types d'essais réalisés

1. *Essais avec lessivage continu*

a) *Nature du dispositif expérimental.*

Le dispositif retenu est constitué par un extracteur Soxhlet, qui a déjà été utilisé pour aborder, au laboratoire, l'étude de l'évolution de minéraux et roches cristallines dans des conditions voisines de celles de la surface du globe (G. Pédro, 1964 ; G. Pédro et K. E. Bittar, 1966).

Les avantages de ce dispositif (fig. 4) sont multiples et ont été indiqués en détail au cours d'un travail antérieur (cf. G. Pédro, 1964) ; rappelons-les très brièvement :

— point de vue hydrique : reproduction à petite échelle du cycle de l'eau dans la nature ;

— point de vue géochimique : les deux phases migratrice et résiduelle de l'altération sont aisément séparées ; la phase migratrice qui s'accumule ainsi dans le ballon récepteur peut être étudiée à chaque instant ;

— point de vue pédogénétique : l'évolution éluviale se produit en effet au sein du manchon extracteur.

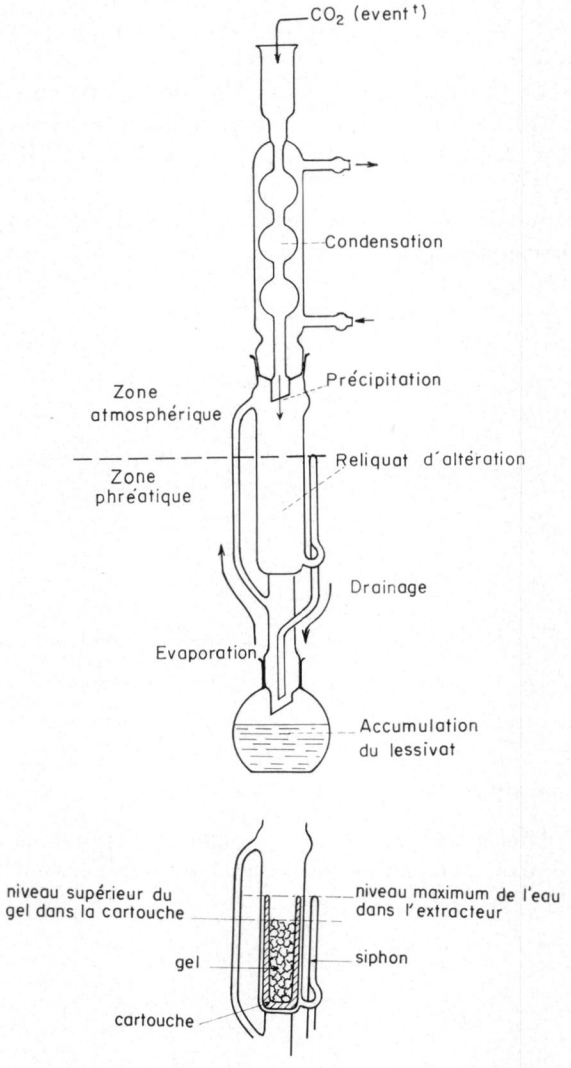


FIG. 4. — *Schéma du dispositif expérimental* (Soxhlet)

En outre ce dispositif permet de mettre en œuvre les différents paramètres qui interviennent généralement au cours de l'évolution superficielle : température, drainage, choix de la solution d'altération...

***

Les conditions expérimentales retenues ici sont identiques à celles utilisées dans les travaux précédents :

— température relativement élevée (70°C) de façon à accélérer les processus naturels ;

— drainage intense et continu, de l'ordre de 3 litres par jour.

Les gels évoluent donc au sein d'une ambiance climatique chaude et humide de type hypertropical.

— Paramètres physico-chimiques : deux sortes de réactifs ont été mis en œuvre : *l'eau pure* (pH = 6,4) et *l'eau chargée de* CO_2 (solution M/100 — pH = 4,5). Le premier a été utilisé sur les 4 catégories de gels (A, B, C et D) et le second sur les 2 derniers (C et D).

Il y a donc eu, au total, *6* essais avec lessivage continu dont les principales caractéristiques sont rassemblées dans le tableau 6.

TABLEAU 6

Agents d'altération	Eau pure				Eau carbonique	
pH de la sol de lessivage	6,4				4,5	
Gels	A	B	C	D	C	D
Drainage (litres/jour)	3 à 3,3	3 à 3,3	3 à 3,2	3,2	3,1	3,2
Température (°C)	70	70	70	70	80	70
Poids du gel au départ (g).	38,70	31,70	33,83	46,17	32,26	46,96
Poids déshydraté au dép. (g).	30,00	26,13	25,45	32,94	23,11	34,30

b) *Mise en place des différents essais en milieu lessivé.*

Une quantité déterminée (30 à 50 g) de fragments, appartenant aux gels A, B, C et D, est disposée dans une cartouche en cellulose ; puis l'ensemble est, à son tour,

TABLEAU 7

Gels de référence	A eau pure	B eau pure	C eau pure	D eau pure	C CO_2	D CO_2
SiO_2	68,2	69,9	34,2	50,5	32,0	51,2
Al_2O_3	31,3	24,7	62,75	48,3	66,25	48,1
Na_2O	0,6	5,5	3,10	1,15	1,7	0,75
Total	100,1	100,1	100,05	99,95	99,95	99,05
Ki	3,7	4,8	0,92	1,78	0,82	1,80
Poids des gels de référence en g (deshydraté)	25,28	23,51	22,13	31,87	21,29	32,64

introduit au sein du manchon extracteur. On constate alors aisément, en examinant la figure 4, que la hauteur de la cartouche étant identique à celle du niveau supérieur du siphon, les matériaux ont toujours évolué au cours de ces essais, dans la zone inférieure (zone de fluctuation hydrique).

Les six Soxhlets sont alors mis en marche, le chauffage nécessaire à l'évaporation de l'eau des ballons et au lessivage étant assuré par des réchauds électriques.

Les différents appareils ont fonctionné au début pendant quelques jours, de façon à laver les matériaux et à enlever ainsi les débris éventuels provenant de l'effritement de quelques fragments, consécutif à la mise en place. Au bout de ce laps de temps (une semaine environ), le contenu de chaque ballon a été transvasé, desséché, pesé et enfin analysé.

Le poids correspondant aux divers éléments (SiO_2, Al_2O_3, Na_2O) a été alors déduit du poids mis initialement dans les cartouches ; on obtient de la sorte la composition réelle des gels au moment du *vrai* départ. C'est celle qui est consignée dans le tableau 7 et qui représente ce qu'on appellera par la suite « gels de référence ».

2. *Expériences sans lessivage — Témoins en milieu non renouvelé*

Parallèlement aux essais précédents qui se rapportent essentiellement à l'étude de l'évolution en présence d'un milieu convenablement drainé, une certaine quantité

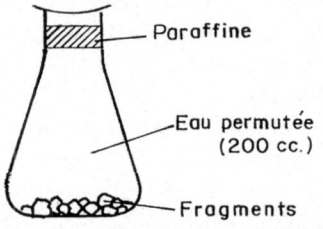


FIG. 5. — *Essai en milieu non renouvelé* (macération)

des différents gels A, B, C, D (de l'ordre de 15 grammes) a été introduite dans 4 erlenmeyers en Pyrex et mise au contact d'un *volume limité et constant d'eau permutée*

TABLEAU 8

Types de gels	Lessivage		Sans lessivage Macération au contact de l'eau pure
	Eau pure	Eau carbonique	
A	+	—	+
B	+	—	+
C	+	+	+
D	+	+	+

(200 cm³ environ). Ces récipients ont été alors placés au sein d'une étuve maintenue à une température *analogue à celle des essais en Soxhlet*, c'est-à-dire 65-70°C ; l'évaporation a pu être évitée au cours de la macération grâce à la présence d'un film de paraffine déposé au-dessus du niveau d'eau (fig. 5).

Ces expériences, qui ont duré 4 mois (temps suffisant à l'obtention de produits cristallisés dans les autres essais), vont servir de *témoins* et permettre ainsi de comparer l'évolution éventuelle des différents gels sous l'action de l'eau, mais avec ou sans lessivage (tabl. 8).

II. — REVUE DES FAITS EXPÉRIMENTAUX

A. — Lessivage a l'eau pure

Protocole analytique général

Les expériences à l'eau pure et, d'une façon générale, tous les essais réalisés ont permis l'obtention d'une série de résultats qui proviennent, d'une part de l'étude de la phase migratrice (*Lessivat*) et d'autre part de l'examen des matériaux résultant de l'évolution *in situ* (*Reliquat*).

a) Les différents lessivats, en effet, ont été récupérés dans chaque ballon, à des intervalles plus ou moins réguliers qui dépendaient d'ailleurs de la teneur en éléments des eaux de drainage en provenance du manchon supérieur. A ce sujet, l'opacité du liquide contenu dans le ballon récepteur a donné quelquefois une indication en ce qui concerne l'intensité de l'exportation.

Chaque lessivat a été alors caractérisé par les données suivantes :

— nombre de litres de lessivage lui correspondant ;

— poids total de matière lessivée (exprimé en déshydraté) ;

— composition centésimale : SiO_2, Al_2O_3, Na_2O (les anions Cl^- et NO_3^- n'étant pas comptés dans le poids déshydraté) ;

— paramètre moléculaire $Ki = SiO_2/Al_2O_3$, à partir desquelles on peut tirer les résultats ci-après :

— la composition pondérale du litre de lessivage, exprimée en milligrammes par litre, et correspondant à l'intensité de l'exportation chimique ;

— la composition du lessivat moyen (en p. 100), qui permet de caractériser la dynamique géochimique de l'évolution ;

— enfin, l'évolution de la composition du reliquat au cours de l'expérience en utilisant le gel de référence comme point de départ.

b) Les reliquats globaux n'ont été récupérés et analysés qu'à la fin des traitements. Cependant leur évolution continue à été suivie au cours des essais sur le plan géochimique par l'intermédiaire des calculs mentionnés ci-dessus et sur le plan minéralogique grâce à des prélèvements de quelques dizaines de milligrammes, effectués de temps à autre et permettant l'étude en diffraction X.

Lors de l'arrêt définitif, chaque reliquat a été étudié en détail et caractérisé par divers éléments :

— poids total restant, après séchage à 105°C pendant quelques jours ;

— teneur en eau, d'où évaluation du poids déshydraté ;

TABLEAU 9

Évolution de la composition des eaux de lessivage dans les 4 essais en fonction du temps

A

N° série	Lavage préliminaire	1	2	3	4	5	6	Composition du lessivat moyen
Volume de lessivage (l) :								
cumulé		150	282	367	457	697	907	
Δl		150	132	85	90	240	210	
Poids déshydraté (g)	4,67	4,226	3,419	1,642	1,019	1,810	1,205	
SiO_2	85,70	89,90	99,50	94,80	96,80	97,80	95,50	97,0
Al_2O_3	3,65	0,60	0,23	2,66	3,19	1,66	2,90	1,5
Na_2O	10,70	0,16	0,13	2,02	0,51	0,60	1,60	0,7
Total	100,05	99,66	99,86	99,48	100,50	100,06	100,00	100,0

B

N° série	Lavage préliminaire	1	2	3	4	Composition du lessivat moyen
Volume de lessivage (l) :						
cumulé		150	282	367	457	
Δl		150	132	85	90	
Poids déshydraté (g)	2,59	7,52	7,95	2,90	1,76	
SiO_2	83,0	81,6	77,7	72,8	73,7	78,1
Al_2O_3	10,4	11,6	15,3	18,1	20,4	14,8
Na_2O	6,56	6,82	7,02	9,17	5,90	7,1
Total	99,96	100,02	100,02	100,07	100,00	100,0

TABLEAU 9 (*suite*)

C

N° série	Lavage préliminaire	1	2	3	4	5	Composition du lessivat moyen
Volume de lessivage (l):							
cumulé		117	242	362	512	800	
Δl		117	125	120	150	288	
Poids déshydraté (g) ..	2,72	1,78	0,91	0,70	0,574	0,286	
SiO_2	34,6	52,80	80,25	88,59	90,70	91,00	72,0
Al_2O_3	39,0	19,08	13,21	9,58	6,96	7,00	14,0
Na_2O	26,3	28,10	6,59	2,85	2,43	2,10	14,0
Total	100,0	99,98	100,05	100,04	100,09	100,10	100,0

D

N° série	Lavage préliminaire	1	2	3	4	5	6	Composition du lessivat moyen
Volume de lessivage (l) :								
cumulé		117	242	362	512	800	866	
Δl		117	125	120	150	288	66	
Poids déshydraté (g) ..	1,47	1,56	1,36	1,14	0,95	1,20	0,378	
SiO_2	61,0	86,4	96,0	96,0	96,7	97,5	95,2	94,0
Al_2O_3	20,3	1,60	0,75	2,1	1,9	2,0	3,9	1,5
Na_2O	18,6	12,1	3,3	1,2	1,4	0,95	1,3	4,5
Total	99,9	100,1	100,05	100,1	100,0	100,45	100,4	100,0

— composition chimique, avec détermination du paramètre Ki;

— nature des minéraux de néoformation et établissement de la constitution minéralogique;

— aspect général et texture, celle-ci pouvant être différente suivant la position des fragments dans le manchon.

N. B. — Pendant toute la durée des différents essais, les pH ont été mesurés tous les 8 à 10 jours, d'une part dans le manchon (solutions provenant de l'évolution *in situ*) et d'autre part dans le ballon (solutions d'accumulation).

1. *Caractérisation géochimique des eaux de lessivage et dynamique générale de l'évolution*

Lors de la première récupération effectuée à l'issue du lavage préliminaire, une assez grande quantité de particules a été éliminée par voie mécanique ; d'où l'aspect extrêmement dense du liquide dans le ballon. Par la suite, l'exportation se faisant essentiellement par voie chimique, le contenu du ballon récepteur à la fin de chaque série était beaucoup plus clair et se présentait habituellement à l'état d'une légère opalescence : ce sont donc les produits résultant de la concentration de telles eaux de lessivage qui ont servi à étudier la dynamique de l'évolution.

Leurs caractéristiques principales ont été reportées à cet effet, dans les tableaux 9, 10 et 11 dont l'examen permet de faire les remarques suivantes :

TABLEAU 10

Poids total lessivé à la fin des essais
(en g)

Essais	A	B	C	D
SiO_2	13,0	14,2	3,1	6,2
Al_2O_3	0,2	2,7	0,6	0,1
Na_2O	0.1	1,3	0,6	0,3
Poids total	13,3	18,2	4,3	6,6
Volume total de lessivage (litres) ...	907	457	800	866

— le drainage continu et intense provoque un lessivage plus ou moins important des éléments constitutifs : de 5,4 mg/l pour C à 39,7 mg/l pour B. Mais cette élimination n'est pas constante ; elle tend à diminuer progressivement au fur et à mesure de l'essai;

— les lessivats sont toujours très riches en silice qui représente dans tous les cas au moins 70 p. 100 des éléments mobilisés;

— l'exportation de l'aluminium est variable : elle est insignifiante dans le cas des gels « anioniques » (A et D), alors qu'elle est loin d'être négligeable pour les gels « cationiques » (B et C) ;

— enfin, l'exportation du sodium faible dans le cas des gels « anioniques » se fait d'une façon continue et régulière pour les gels B et C.

TABLEAU II

Composition moyenne du litre de lessivage
(mg/l)

Essais	A	B	C	D
SiO_2	14,3	30,9	3,9	7,1
Al_2O_3	0,2	5,9	0,7	0,1
Na_2O	0,1	2,9	0,7	0,4
Total	14,6	39,7	5,4	7,6

A partir des données relatives à chaque série de lessivage (tabl. 9 en particulier) nous avons été amenés à calculer pour les différents essais la composition chi-

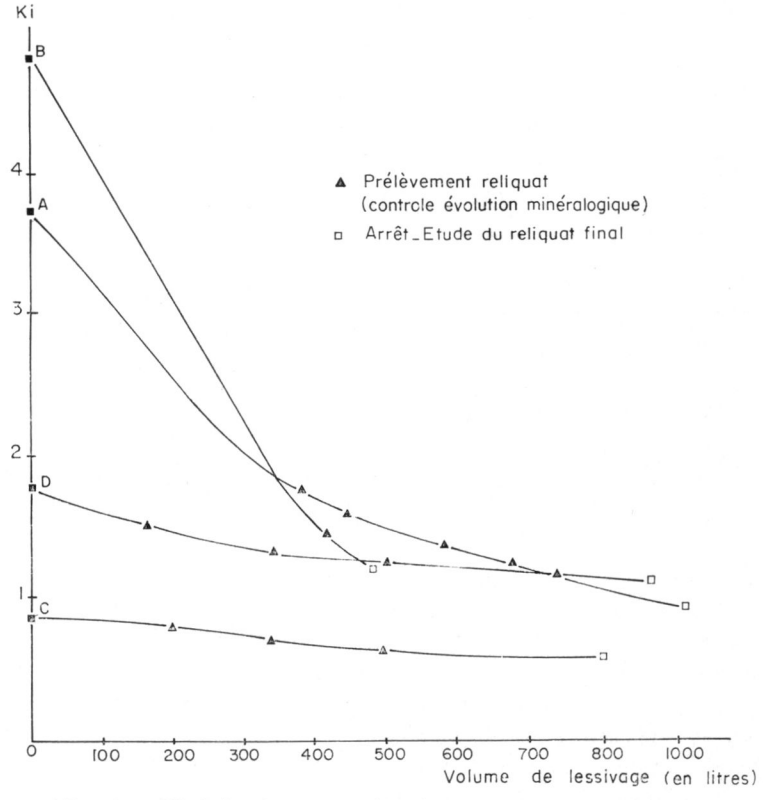


FIG. 6. — *Variation du rapport SiO_2/Al_2O_3 avec la durée du lessivage*
(essais à l'eau)

TABLEAU 12

Évolution de la composition des reliquats pour les 4 gels en fonction de la durée du lessivage

A

Reliquats	Gel de référence A	1	3	4	5	5	6
Volume de lessivage cumulé (l).....		150	282	367	457	697	907
Poids déshydraté (g)	25,28	21,15	17,71	16,05	15,05	130,2	12,0
SiO_2.....	68,2	62,2	54,8	50,7	47,6	40,7	35,4
Al_2O_3.....	31,3	37,3	44,5	48,7	51,8	48,7	64,1
Na_2O_3	0,56	0,6	0,75	0,61	0,61	0,61	0,52
Total.....	100,06	100,1	100,05	100,01	100,01	100,01	100,02
Ki.....	3,71	2,83	2,09	1,77	1,56	1,18	0,94
pH manchon.....	4,2-5,4	5,8-3,6	6,3-4,9	6,4-5,8	6,5-6,4	5,7-4,1	6,6-3,9

B

Reliquats	Gel de référence B	1	2	3	4
Volume de lessivage cumulé (l)		150	282	367	457
Poids déshydraté (g)	23,51	16,00	10,10	7,20	5,44
SiO_2.....	69,9	64,1	56,0	49,3	41,3
Al_2O_3.....	24,7	31,0	40,4	49,4	58,65
Na_2O.....	5,48	4,85	3,56	1,28	—
Total.....	100,08	99,95	99,86	99,98	09,95
Ki.....	4,8	3,53	2,36	1,69	1,19
pH manchon.....	6,4-7,7	4,4-7,8	9,1-6,2	4,8-6,8	5,9-6

TABLEAU 12 (*suite*)

C

Reliquats	Gel de référence C	1	2	3	4	5
Volume de lessivage cumulé (l)		117	242	362	512	800
Poids déshydraté (g)	22,13	20,35	19,44	18,74	18,16	17,87
SiO_2.....	34,2	32,6	30,35	28,3	26,2	25,25
Al_2O_3.....	62,75	66,5	69,05	71,1	73,4	74,50
Na_2O.....	3,07	0,89	0,61	0,54	0,47	0,33
Total.....	100,05	99,99	100,01	99,94	100,07	100,08
Ki.....	0,86	0,83	0,74	0,67	0,61	0,57
pH manchon.....	7,6-8,5	8,8-6,8	7,6-5.5	6,3-5,2	5,8-4,8	4,3-6,4

D

Reliquats	Gel de référence D	1	2	3	4	5	6
Volume de lessivage cumulé (l)		117	242	362	512	800	866
Poids déshydraté (g)	31,87	30,30	28,94	27,86	26,86	25,65	25,26
SiO_2.....	50,5	48,8	46,5	44,4	42,5	39,9	39,3
Al_2O_3.....	48,3	50,8	53,1	55,2	57,0	59,6	60,4
Na_2O.....	1,16	0,56	0,47	0,43	0,42	0,42	0,41
Total.....	99,96	100,16	100,07	100,03	99,92	99,92	100,11
Ki.....	1,78	1,63	1,49	1,37	1,27	1,14	1,11
pH manchon.....	3,9-4,2	4,3-3,9	5-7	6,2-5,4	5,6-4,7	3,9-3,8	6,7

mique du reliquat moyen, correspondant aux séries successives ; c'est ce qui est indiqué dans le tableau 12, en même temps que les valeurs extrêmes du pH des eaux d'altération à la sortie du manchon. Cela permet de se faire une idée de l'évolution, surtout par l'intermédiaire du paramètre moléculaire Ki = SiO_2/Al_2O_3, qui diminue comme on le voit dans les 4 expériences, pour atteindre des valeurs très basses, voisines de 1 pour A, B et D et de l'ordre de 0,6 dans le cas du gel C (fig. 6).

Ainsi, un simple lessivage à l'eau semble avoir provoqué une évolution chimique notable des matériaux, qui se traduit avant tout par une désilicification massive et plus ou moins rapide du milieu.

2. *Étude de la constitution des reliquats de l'altération*

Les prélèvements effectués en cours d'expérience à partir de 300 litres de lessivage, ont permis de constater que de la boehmite AlO.OH s'individualise progressivement au sein des reliquats. Les réflexions X sont d'ailleurs très nettes (6,11 Å — 3,16 — 2,35 ...) et s'affirment de plus en plus jusqu'à l'arrêt de l'essai. En même temps, ce résultat concorde avec l'apparition d'un crochet endothermique vers 450°C sur les courbes d'analyse thermique différentielle. Mais, c'est tout ce qui a pu être réalisé sur les reliquats pendant les essais.

Par contre, lors de l'arrêt définitif, les matériaux ont été étudiés complètement, c'est-à-dire par diverses voies chimiques et minéralogiques ; notons à ce propos que les examens ont été effectués non seulement sur un échantillon moyen du reliquat, mais aussi sur les particules les plus évoluées, concentrées en général dans le niveau éluvial supérieur et présentant d'ailleurs le plus souvent un aspect crayeux ou même quelquefois franchement poudreux.

TABLEAU 13

Composition minéralogique des reliquats globaux à la fin des essais

Essais		A	B	C	D
Boehmite		37,0	25,0	27,4	10,0
Matière amorphe (alumino-silicique)	SiO_2	24,0	26,0	17,9	27,0
	Al_2O_3	14,0	15,5	27,1	33,0
	Na_2O	0,3	0,6	0,3	0,2
	H_2O	24,0	33,0	27,3	29,0
Total		99,3	100,1	100,0	99,2

Les spectres de diffraction X (pl. 1, p. 314 et fig. 12, p. 320) ainsi que les courbes d'analyse thermique différentielle (fig. 7, 8, 9 et 10) montrent, dans les 4 essais, la formation d'un oxyhydroxyde d'aluminium cristallisant à l'état de γ AlO.OH (Boehmite) et dont l'évaluation quantitative a été réalisée d'après les courbes thermopondérales (fig. 11). Si l'on étudie tout d'abord les reliquats *globaux*, on trouve des teneurs en boehmite allant de 10 p. 100 (D) à 37 p. 100 (A), le restant étant constitué par un matériau amorphe aluminosilicique plus ou moins affecté (tabl. 13). Par contre, si l'on s'adresse

aux fractions de la zone supérieure, l'évolution est nettement plus avancée, comme en témoignent les courbes thermogravimétriques de la figure 11 et les valeurs du paramètre Ki (tabl. 14) : la boehmite représente alors pondéralement 20 p. 100 en D, 34 p. 100 en B, 40 p. 100 en C et 70 p. 100 en A auquel cas la BEC devient pratiquement insignifiante (tabl. 14).

TABLEAU 14

Composition chimique et minéralogique des fractions poudreuses de la zone supérieure des manchons

Essais		A	B	C	D
Boehmite		70	34	40	20
Matière amorphe	SiO_2	8,1	24,7	17,3	23,8
	Al_2O_3	6,4	11,5	15,5	30,0
	Na_2O	0,2	0,3	0,3	0,2
	H_2O	15,3	29,4	26,8	27,0
		100,0	99,9	99,9	100,0
Ki global		0,21	1,03	0,62	0,86
BEC (méq/100 g)		3,5	54	5,2	13
Surface (m^2/g)		152	362	—	325

3. *Conclusions*

Le lessivage continu à l'eau semble être à l'origine d'une profonde évolution des gels amorphes de départ que l'on peut résumer ici en considérant successivement les points de vue géochimique et cristallochimique.

— *Sur le plan géochimique* tout d'abord, on doit noter :

a) le comportement *identique* de la silice dans les 4 essais, puisque celle-ci est toujours lessivée (tabl. 15).

TABLEAU 15 *a*

Bilan de la silice

Essais	A	B	C	D
Volume total lessivage (l)	910	460	800	870
SiO_2 exporté (%)	75,0	86,6	40,8	38,5

Notons toutefois que la désilicification est plus ou moins importante suivant les essais et qu'elle est nettement plus élevée dans le cas des gels hypersiliceux (A et B) que pour les matériaux hyposiliceux (C et D).

b) Le comportement relativement *variable* de l'aluminium. Le tableau 15 *b* qui rassemble les données concernant le bilan global d'Al_2O_3 montre, en effet, que si l'alumine est *dans l'ensemble* maintenue au sein du reliquat d'altération, son élimination avec les eaux de lessivage peut être dans certains cas (B par exemple) très importante. Il semble que ce soit ici l'état cationique ou anionique du matériau et, dans une certaine mesure, l'existence d'aluminium tétracoordonné qui interviennent sur le comportement d'Al_2O_3. D'après les résultats obtenus au cours de ces recherches, l'aluminium aurait en effet tendance à être lessivé d'autant plus aisément que nous avons à faire à des gels « cationiques » et à forte teneur en Al^{IV}.

TABLEAU 15 *b*

Bilan de l'aluminium

Forme de l'aluminium	A	B	C	D
Al_2O_3 lessivé	2,5	46,6	4,3	0,7
Al_2O_3 maintenu *in situ*...	97,5	53,4	95,7	99,3
Al_2O_3 libre et cristallisée (Boehmite) ...	67,1	31,0	44,3	20,1
Al_2O_3 à état amorphe..	30,4	22.4	51,4	79,2

— *Sur le plan cristallochimique,* on est amené à faire ressortir essentiellement 2 points :

a) d'une part, l'individualisation de *boehmite* γ AlO.OH bien cristallisée dans les 4 essais ;

b) d'autre part, la transformation de l'aluminium tétracoordonné en Al hexacoordonné (boehmite) au cours de l'évolution. Ceci est particulièrement net pour les gels hypersiliceux (A et B) au sein desquels Al^{IV} représentait, au départ, soit la forme prédominante (68 p. 100 en A), soit la forme exclusive (100 p. 100 en B).

Ainsi, quelles que soient la nature et la composition des gels aluminosiliciques mis en expérience, le lessivage à l'eau pure a provoqué une évolution du *même type* qui se traduit par :

— une désilicification notable du matériel avec diminution progressive du rapport SiO_2/Al_2O_3. Certes, l'aluminium n'est pas dans tous les cas maintenu intégralement sur place ; néanmoins la vitesse d'élimination de SiO_2 reste toujours très supérieure à la vitesse d'évacuation d'Al_2O_3 :

$$q(SiO_2) > q(Al_2O_3)$$

— une individualisation d'alumine libre qui cristallise parfaitement dans tous les essais sous forme de l'oxyhydroxyde γ AlO.OH (monohydrate), c'est-à-dire de boehmite (pl. 1).

Naturellement, la constitution du gel intervient dans les phénomènes du point de vue quantitatif (intensité de la désilicification, « rendement » en boehmite ...) ; c'est ce qui sera envisagé plus en détail au cours de la troisième partie.

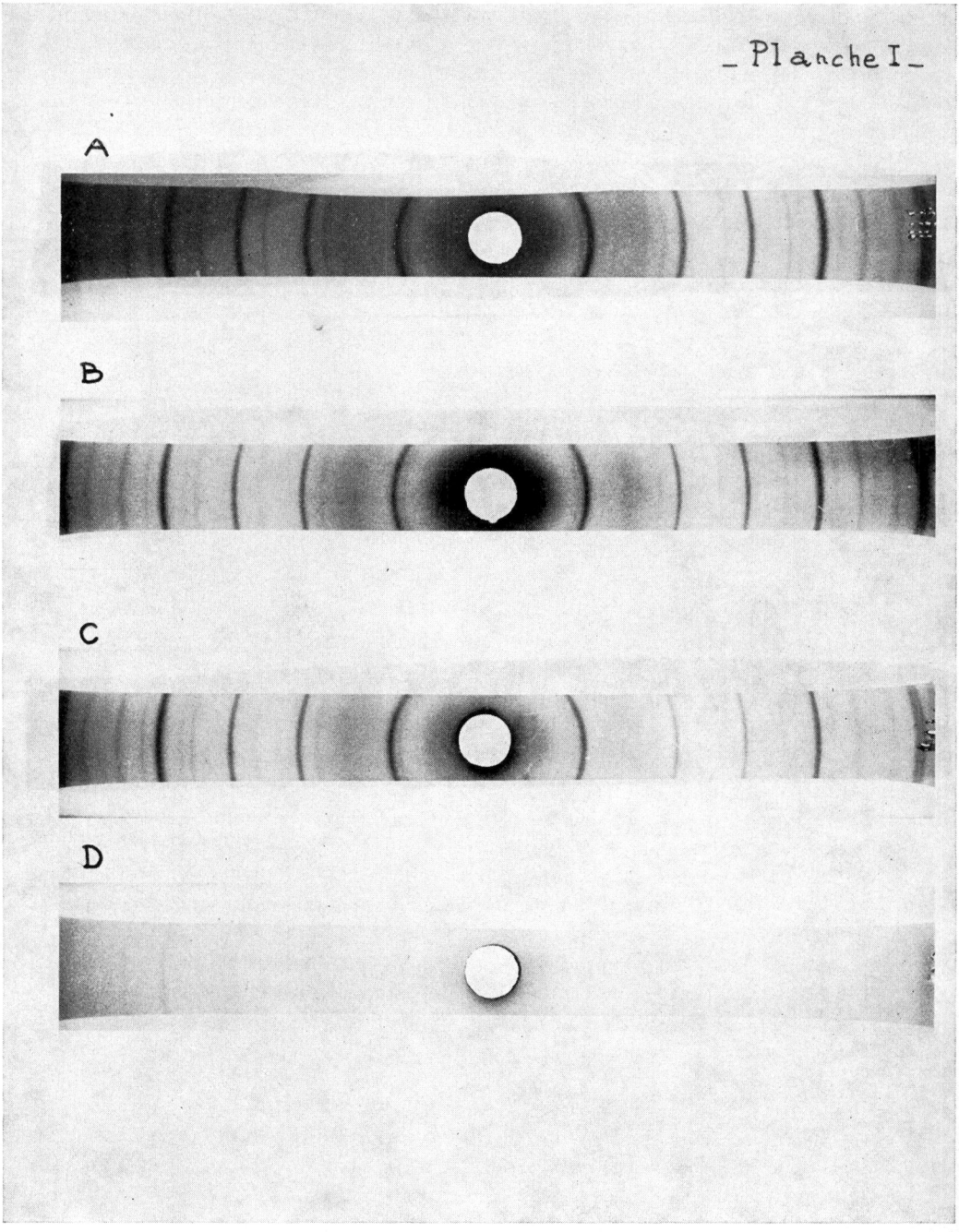


PLANCHE I. — *Spectres de diffraction X des reliquats des essais à l'eau pure* (A, B, C et D)

B. — Lessivage a l'eau carbonique

Deux des quatre gels précédents ont été soumis à ce traitement : ce sont les matériaux hyposiliceux ; mais l'un est de type « cationique » (C) et l'autre de type « anionique » (D). L'étude de leur évolution sera effectuée en suivant le protocole expérimental défini précédemment.

1. *Caractérisation géochimique des eaux de lessivage et dynamique générale de l'évolution*

L'ensemble des données analytiques relatives aux récupérations successives du lessivat a été rassemblé dans les tableaux 16, 17 et 18 ; elle permet de déduire les quelques considérations ci-après :

TABLEAU 16

Poids lessivé à la fin des essais carboniques
(en g)

Essais	C	D
SiO_2	4,5	7,6
Al_2O_3	0,3	0,5
Na_2O	0,3	0,2
Total	5,1	8,3
Volume de lessivage (litres)	611	866

— le lessivage carbonique provoque un entraînement en solution, qui est pour les 2 gels légèrement plus élevé que dans les essais à l'eau pure (tabl. 17) ;

— la silice est fortement éliminée, puisque la teneur en SiO_2 des lessivats moyens oscille autour de 90 p. 100 du total exporté ;

TABLEAU 17

Composition moyenne du litre de lessivage
(mg/l)

Essais	C		D	
	Eau	CO_2	Eau	CO_2
SiO_2	3,9	7,3	7,1	8,8
Al_2O_3	0,7	0,5	0,1	0,5
Na_2O	0,7	0,5	0,4	0,2
Total	5,3	8,3	7,6	9,5

— la majeure partie de l'aluminium (97 p. 100 environ dans les 2 cas) est maintenue sur place ;

— enfin, l'élimination du sodium est brutale et se fait essentiellement au début du traitement.

TABLEAU 18

Évolution de la composition des eaux de lessivage dans les 2 essais carboniques (C et D)

C (CO_2)

N° série	Lavage préliminaire	1	2	3	4	5	Composition du lessivat moyen
Volume de lessivage (l) cumulé	—	117	242	362	512	611	
Δl		117	125	120	150	99	
Poids déshydraté (g) ..	2,41	1,980	1,420	0,807	0,578	0,249	
SiO_2	53,5	79,10	96,40	95,30	88,60	84,40	88,4
Al_2O_3	6,2	8,45	1,91	2,85	10,01	14,86	5,8
Na_2O	40,2	12,50	1,78	1,85	1,38	0,80	5,8
Total	99,9	100,05	100,09	100,00	99,99	100,06	100,0

D (CO_2)

N° série	Lavage préliminaire	1	2	3	4	5	6	Composition du lessivat moyen
Volume de lessivage (l)		117	242	362	512	800	866	
Δl		117	125	120	150	288	66	
Poids déshydraté (g) ..	1,32	2,08	1,62	1,38	1,36	1,43	0,34	
SiO_2	45,5	84,20	94,20	95,70	95,70	96,00	98,40	91,6
Al_2O_3	22,7	12,00	3,38	2,90	3,68	3,15	0,78	6,0
Na_2O	31,8	3,85	2,40	1,45	0,88	1,05	0,95	2,4
Total	100,0	100,05	99,98	100,05	100,26	100,20	100,13	100,0

Ainsi, le lessivage continu à l'eau carbonique provoque une désalcalinisation rapide et une intense désilicification du gel de départ. Le reliquat moyen devient de plus en plus riche en aluminium comme le montrent les évaluations effectuées après chaque extraction et consignées dans le tableau 19. A la fin des essais, le paramètre $Ki = SiO_2/Al_2O_3$ du matériau en voie d'évolution n'était plus de ce fait que de 0,3 pour C et 1,0 pour D.

TABLEAU 19

Évolution de la composition des reliquats dans les 2 essais carboniques

C (CO_2)

Reliquats	Gel de référence C	1	2	3	4	5
Volume de lessivage cumulé (l).....		117	242	362	512	615
Poids déshydraté (g)	21,29	19,31	17,89	17,08	10,50	16,25
SiO_2.....	32,0	26,8	21,25	17,75	15,2	14,1
Al_2O_3.....	66,25	72,75	78,3	82,0	84,4	85,5
Na_2O.....	1,72	0,62	0,42	0,35	0,34	0,32
Total.....	99,97	100,07	99,97	100,10	99,94	99,92
Ki.....	0,822	0,627	0,462	0,368	0,303	0,280
pH manchon (moy. 5,2)	6,1-6,3	5,9-5,4	5,1-5,2	5,5-4,8	5,1-4,4	4,2-4,8

D (CO_2)

Reliquats	Gel de référence D	1	2	3	4	5	6
Volume de lessivage cumulé (l).....		117	242	362	512	800	866
Poids déshydraté (g)	32,64	30,56	28,93	27,55	26,19	24,76	24,42
SiO_2.....	51,2	49,0	46,4	43,9	41,2	38,2	37,3
Al_2O_3.....	48,1	50,6	53,3	55,8	58,5	61,6	63,5
Na_2O.....	0,73	0,52	0,41	0,36	0,33	0,28	0,27
Total.....	100,03	100,12	100,11	100,06	100,03	100,08	100,06
Ki.....	1,80	1,64	1,48	1,34	1,20	1,05	1,01
pH manchon. (moy. 4,5).....	3,7-3,9	4,3-4	3,7-4,8	4,2-4,9	5-4,1	4,2-5,2	4,1

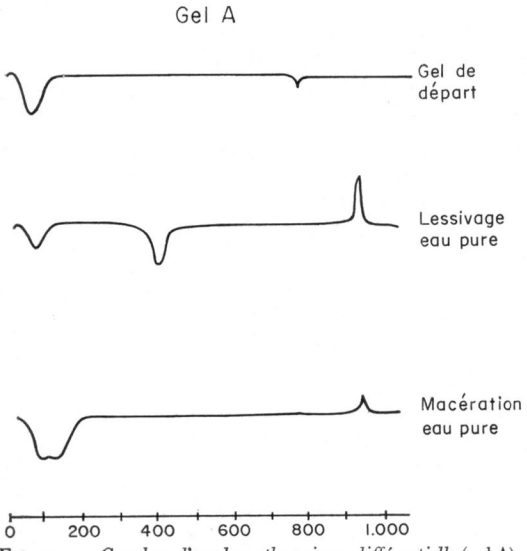


FIG. 7. — *Courbes d'analyse thermique différentielle* (gel A)

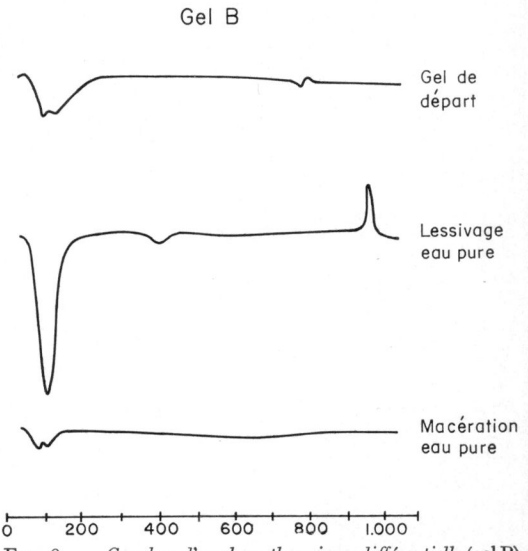


FIG. 8. — *Courbes d'analyse thermique différentielle* (gel B)

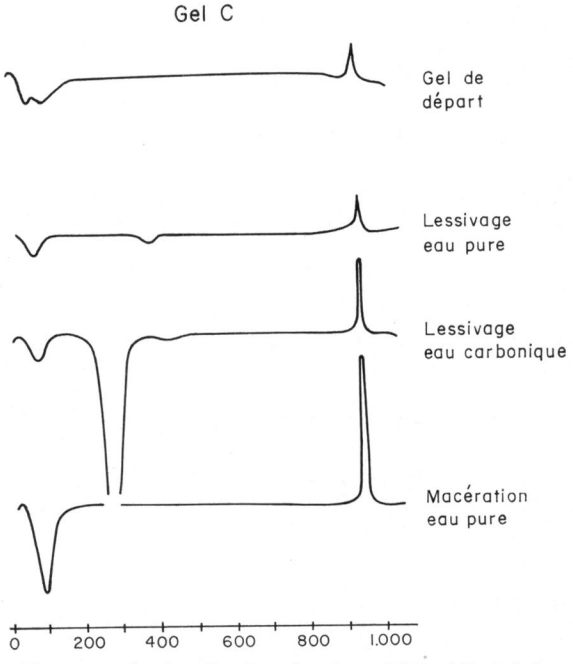


FIG. 9. — *Courbes d'analyse thermique différentielle* (gel C

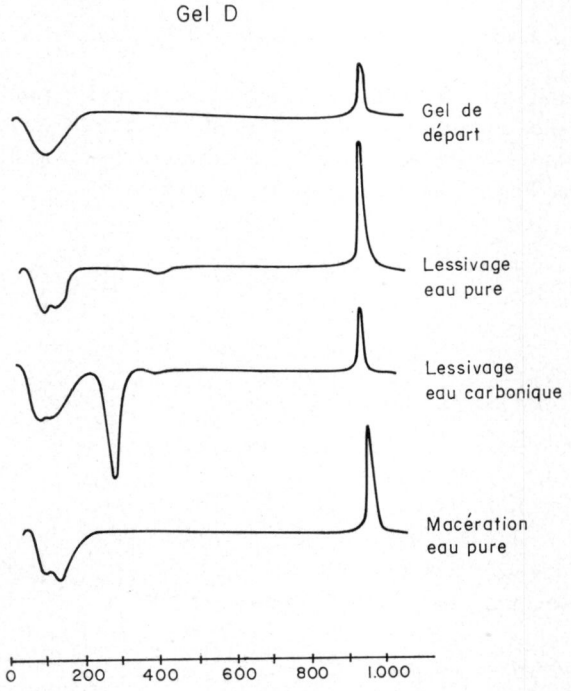


FIG. 10. — *Courbes d'analyse thermique différentielle* (gel D)

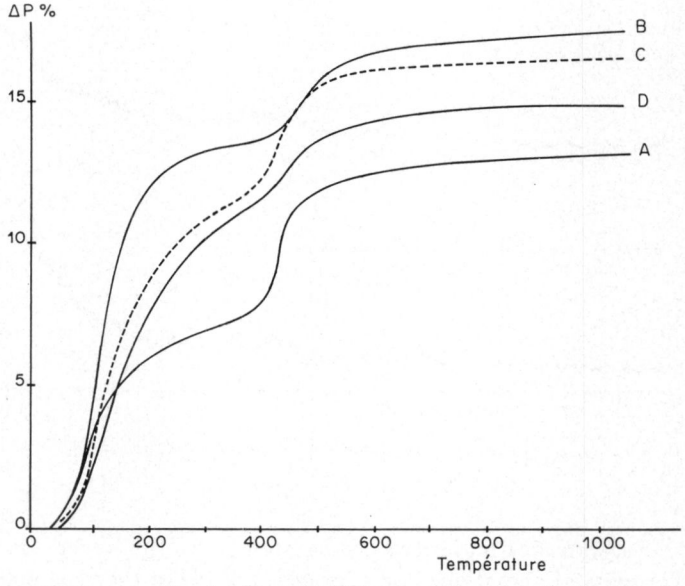


FIG. 11. — *Courbes thermopondérales des reliquats A, B, C et D provenant des essais à l'eau pure*

2. *Étude de la constitution des reliquats d'altération*

Les déterminations effectuées en cours d'essai sur des prélèvements partiels mettent en évidence après un écoulement voisin de 200 litres, une néoformation d'hydroxyde de type gibbsite $Al(OH)_3$. Par la suite, ces déterminations ont été entièrement confirmées lors des études détaillées qui ont été réalisées à la fin des expé-

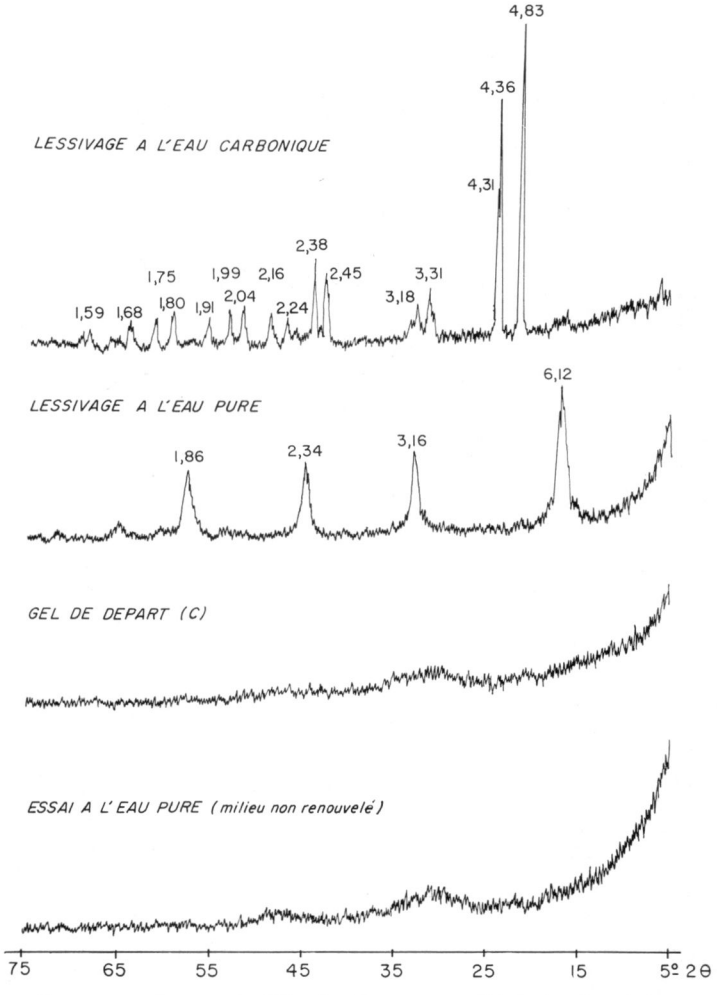


FIG. 12. — *Spectres de diffraction X concernant l'évolution du gel C*

riences sur l'ensemble des matériaux : diagrammes X, (pl. 11 et fig. 12), courbes d'analyse thermique différentielle (fig. 7, 8, 9, 10), courbes thermopondérales (fig. 11, 13 et 14), spectres infrarouges (fig. 15).

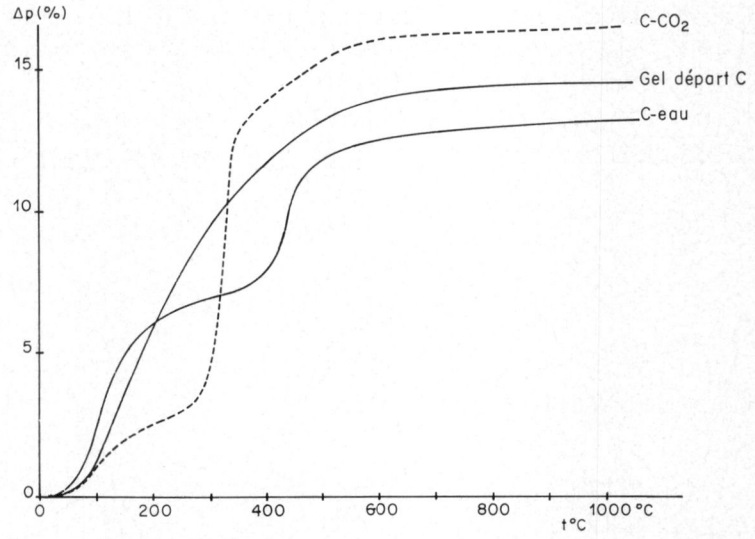


FIG. 13. — *Courbes thermopondérales des reliquats C provenant des essais à l'eau pure et sous atmosphère de CO_2*

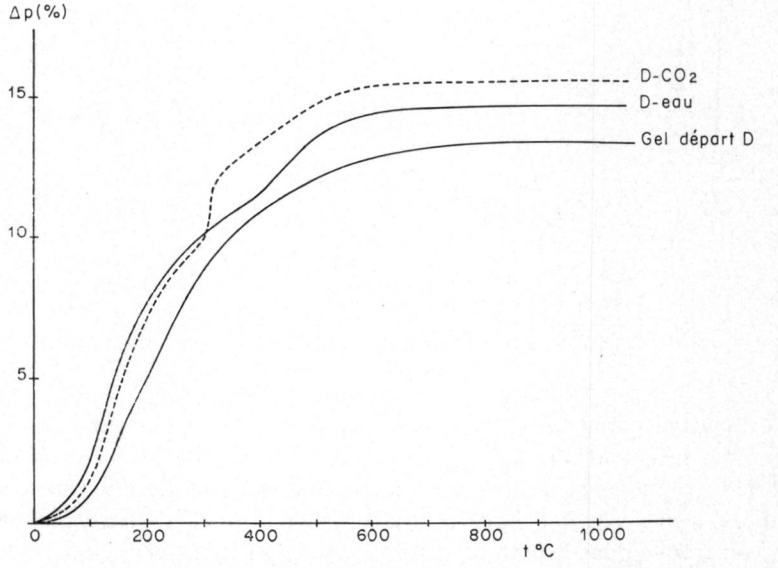


FIG. 14. — *Courbes thermopondérales des reliquats D provenant des essais à l'eau pure et sous atmosphère de CO_2*

L'évolution se traduit donc par l'individualisation *in situ*, soit exclusivement (C), soit essentiellement (D) d'un trihydrate d'aluminium bien cristallisé qui correspond à la variété naturelle connue sous le nom de gibbsite $Al(OH)_3$ [raies à 4,85 (TF) ; 4,34 ; 3,19 ; 2,45 ; 2,38 ; 2,25 ... sur les spectres X — bandes d'absorption infrarouge à ε 460, 3 520 et 3 620 cm^{-1} cf. H. BOSMANS, 1966].

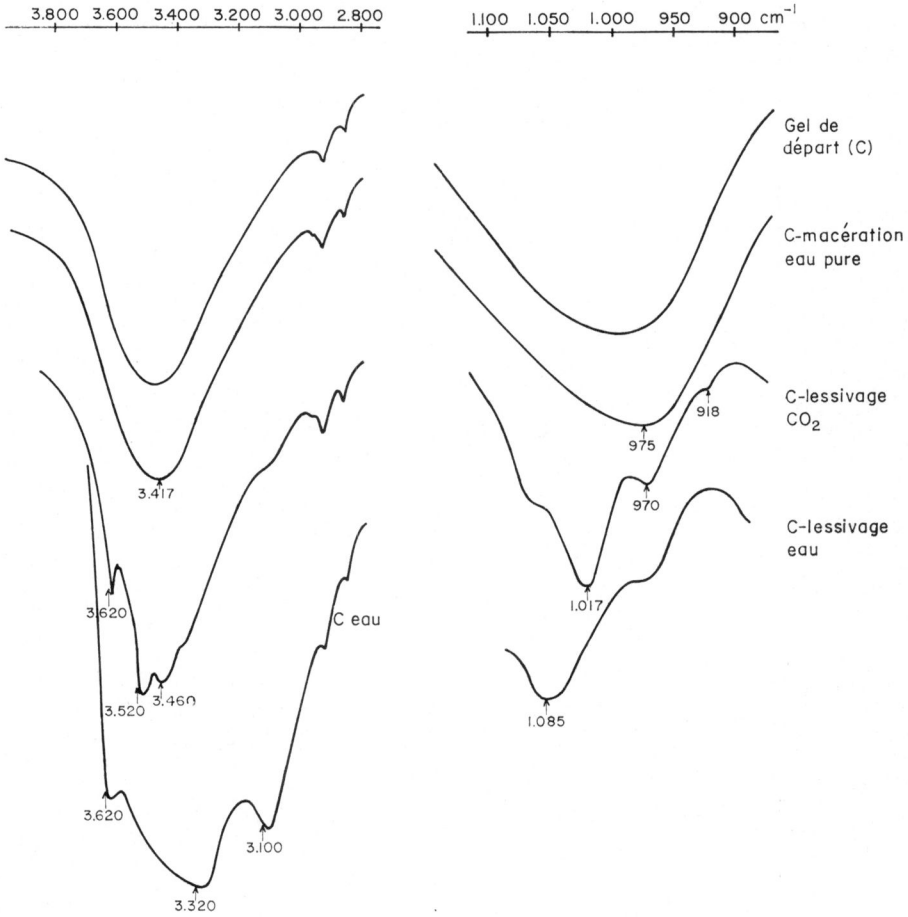


FIG. 15. — *Spectres infrarouges relatifs à l'évolution du gel C*

L'évaluation quantitative effectuée d'après les données thermogravimétriques conduit à des teneurs de l'ordre de 75 p. 100 de gibbsite dans les fractions poudreuses de C et de 58 p. 100 au sein du reliquat final. Tout se passe dans ce cas comme si l'on avait abouti à une véritable bauxite. En ce qui concerne D, les résultats ne sont pas si nets : on trouve dans l'ensemble 17 p. 100 de gibbsite associés à environ 5 p. 100 de boehmite ; les capacités d'échange toutefois deviennent dans les 2 essais pratiquement insignifiantes. Les tableaux 20 et 21 rassemblent à cet effet les données concernant la composition et les principales caractéristiques des reliquats étudiés.

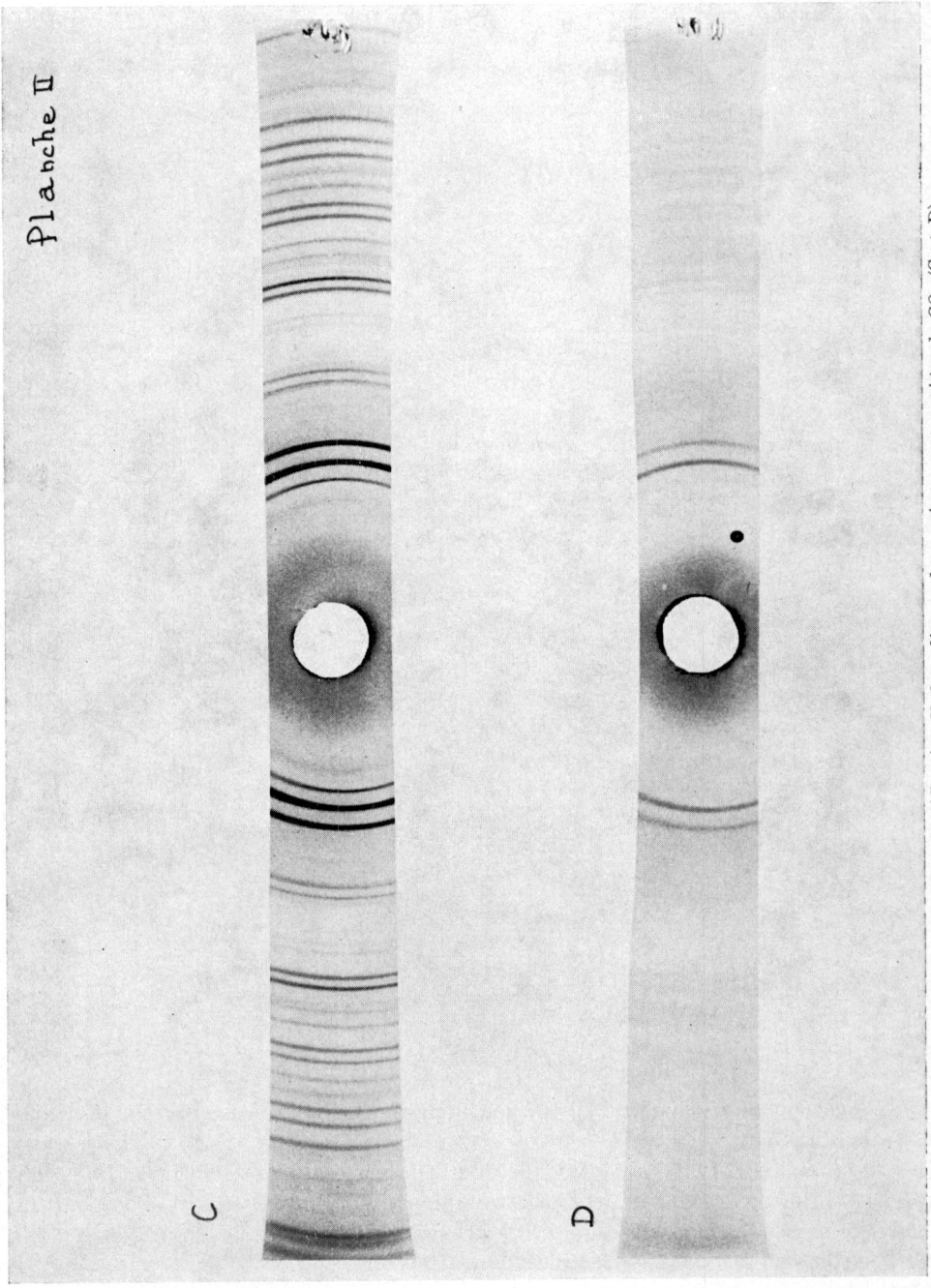


PLANCHE 2. — *Spectres de diffraction X des reliquats des essais sous atmosphère de CO_2* (C et D)

TABLEAU 20

Composition minéralogique des reliquats globaux à la fin des essais carboniques

Essais		C (CO_2)	D (CO_2)
Gibbsite		58	17
Boehmite		—	5
Matière amorphe	SiO_2	9,6	25,9
	Al_2O_3	19,6	27,0
	Na_2O	0,2	0,2
	H_2O	12,4	25,0
Total		99,8	99,1

TABLEAU 21

Composition chimique et minéralogique des fractions poudreuses de la zone supérieure des manchons

Essais		C (CO_2)	D (CO_2)
Gibbsite		75	17
Boehmite		—	3
Matière amorphe	SiO_2	4,0	24,8
	Al_2O_3	14,1	30,0
	Na_2O	0,3	0,2
	H_2O	6,6	25,0
Total		100,0	100,0
Ki global		0,11	0,97
BEC (méq/100 g)		2,4	9
Surface (m^2/g)		—	212

3. *Conclusions relatives aux essais « carboniques »*

a) sur le plan géochimique, l'évolution en présence de CO_2 se traduit par les traits essentiels suivants :

— une élimination importante de la silice dans les 2 cas : 66 p. 100 de SiO_2 présent initialement pour un lessivage total de 615 litres en C et 46 p. 100 pour un lessivage de 870 litres en D. Par comparaison avec les essais à l'eau pure, l'exportation de silice paraît ainsi avoir été nettement favorisée (cf. tabl. 15, p. 312) ;

— un comportement sensiblement identique de l'aluminium qui s'est maintenu en quasi-totalité dans les reliquats au cours de l'altération (tabl. 22).

La tendance évolutive générale [$q(SiO_2) > q(Al_2O_3)$] ne semble donc pas avoir été modifiée par la mise en œuvre de CO_2.

b) *sur le plan cristallochimique*, on est amené à faire ressortir les 2 points ci-après :

— la genèse d'un trihydrate d'aluminium cristallisé (gibbsite) en C et D à la place de l'individualisation exclusive de monohydrate (boehmite) dans les essais à l'eau portant sur les mêmes gels ;

TABLEAU 22

Bilan de l'aluminium

Forme de l'aluminium	C (CO_2)	D (CO_2)
Al_2O_3 lessivé	2,1	3,2
Al_2O_3 maintenu *in situ*	97,9	96,8
Al_2O_3 libre et cristallisée (Gibbsite)	64,5	33,1
Al_2O_3 à l'état amorphe	33,4	33,7

— une cristallisation nette pour C (les 2/3 de l'alumine du reliquat sont à l'état de gibbsite), mais moins aisée pour D (1/3 seulement de la teneur en Al_2O_3 se présente sous forme d'hydroxydes définis). Tout se passe donc comme si, dans une évolution d'un type donné, l'édification d'un réseau d'hydroxyde gibbsitique était d'autant plus facile que l'on a affaire à un milieu moins siliceux.

C. — Essais réalisés en présence d'un volume limité d'eau (milieu non renouvelé)

Après 4 mois de macération au contact de 200 cm^3 d'eau pure, les gels témoins A, B, C et D ont été récupérés afin de procéder aux examens habituels : analyse chimique, mesure de la capacité d'échange et de la surface spécifique, étude en diffraction X, méthodes thermiques...

Les données physico-chimiques sont rassemblées dans le tableau 23, en même temps que celles concernant les gels de départ. D'après ce tableau, on peut constater que la composition chimique n'a été que très légèrement modifiée au cours de la macération. Mais cette variation s'est faite en réalité suivant deux directions :

— en A et D, le rapport SiO_2/Al_2O_3 a eu tendance à augmenter ; les gels se sont donc appauvris en aluminium ;

— en B et C, le rapport SiO_2/Al_2O_3 a un peu diminué, ce qui indique un appauvrissement en silice.

Or, on se rappelle que A et D sont de type « anionique » (tabl. 4) ; au cours de l'essai les anions sont donc passés en solution de façon relativement aisée, de telle sorte que les deux matériaux ont évolué en milieu acide ; d'où l'extraction d'une petite quantité d'aluminium.

Par contre, B et C sont de type « cationique » avec excédent d'ions Na (tabl. 4) ; pendant la macération, ce sont alors les cations qui sont passés plus rapidement en solution : le milieu est devenu légèrement alcalin, avec maintien d'Al_2O_3 au sein de la phase solide.

Ainsi, l'évolution géochimique, qui se produit dans les 4 essais servant de témoins, apparaît comme étant très limitée et ceci résulte probablement de la saturation rapide de ces types de milieux non renouvelés. C'est pourquoi la légère tendance évolutive ne peut dépendre dans ce cas que de la présence, au sein des gels, d'anions ou de cations (caractéristiques physico-chimiques intrinsèques des matériaux).

TABLEAU 23

Caractéristiques physico-chimiques

Nature des gels		Composition (%)				Ki	BEC (méq/100 g non calciné)	Surface spécifique (m^2/g)
		SiO_2	Al_2O_3	Na_2O	H_2O			
A	Gel de départ.....	55,0	20,9	1,65	21,0	4,5	56	221
	Après macération .	55,6	19,7	0,50	24,2	4,8	23	175
B	Gel de départ.....	58,6	19,5	4,60	17,2	5,2	63	247
	Après macération .	51,9	22,14	5,38	20,6	4,0	14	164
C	Gel de départ.....	25,1	44,2	4,15	28,6	1,0	13	235
	Après macération .	20,6	43,6	2,25	34,6	0,8	14	235
D	Gel de départ.....	36,9	34,1	1,20	27,0	1,8	50	—
	Après macération .	37,6	33,0	0.42	29	1,9	—	102

Sur le plan cristallochimique, il y a eu très probablement quelques modifications dans la texture et la composition des enveloppes ioniques, comme paraissent le montrer les variations de BEC et de surface. Par contre, *il n'y a pas eu de réorganisation structurale, ni d'arrangement cristallin.* Les spectres X qui ne mettent en évidence aucune réflexion de Bragg (fig. 16) d'une part, et les courbes d'analyse thermique différentielle (fig. 7, 8, 9 et 10, p. 318) et les spectres infrarouges (fig. 15, p. 322) d'autre part, sont tout à fait semblables à ceux des matériaux de départ.

Conclusions

Ainsi, en l'absence de lessivage, c'est-à-dire d'un renouvellement continu des solutions de contact, les gels n'ont pratiquement pas évolué et sont restés amorphes. Dans aucun des cas, il n'y a eu au sein de l'eau démixtion spontanée Si-Al, individualisation d'alumine libre et édification d'hydroxydes d'aluminium cristallisés. C'est là la différence la plus marquante par rapport aux résultats des deux groupes d'essais envisagés au cours des paragraphes précédents.

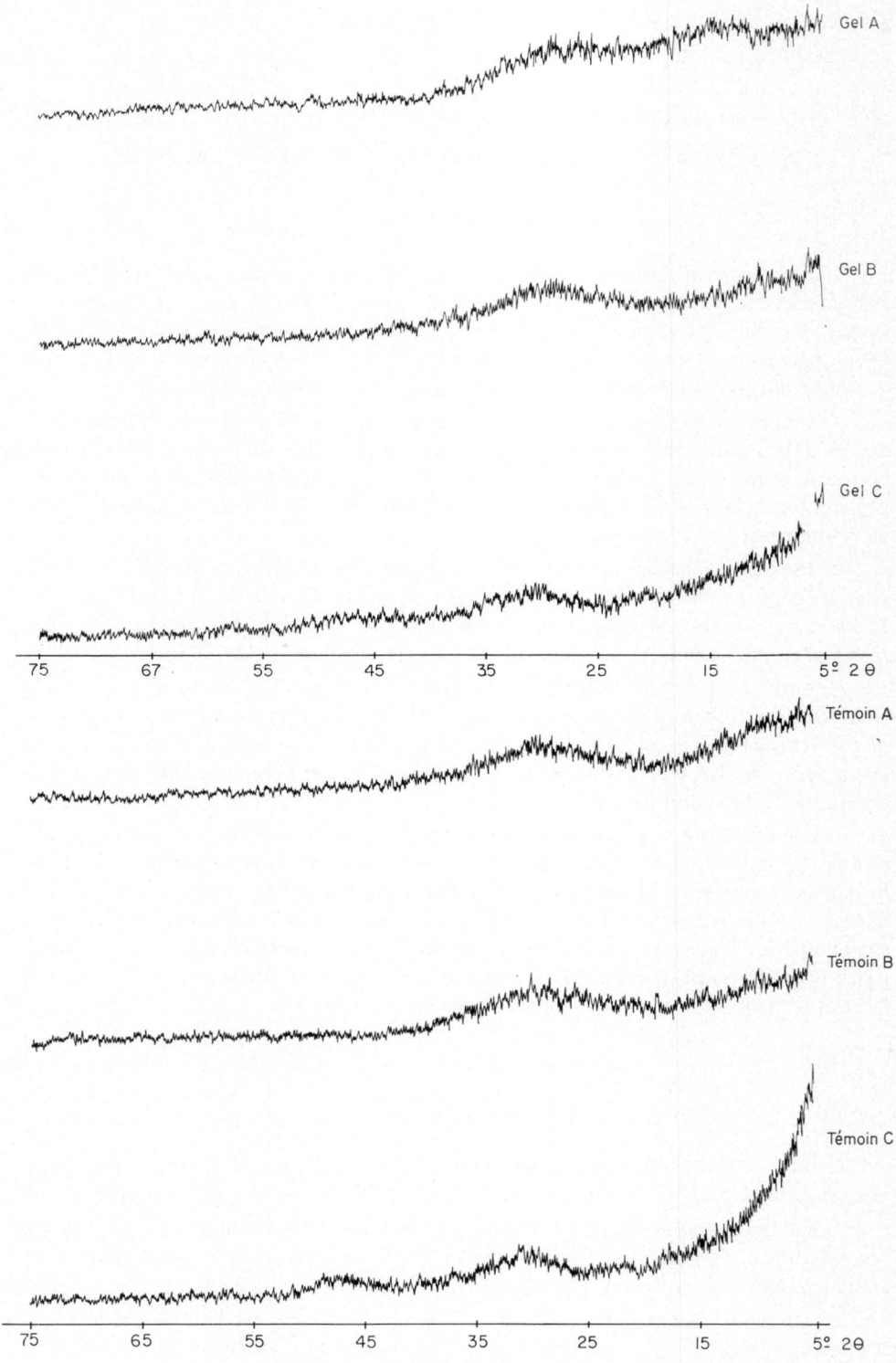


FIG. 16. — *Spectres de diffraction X des gels de départ et des produits résultant des essais de macération* (A, B et C)

III. — CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES SUR L'ÉVOLUTION GÉOCHIMIQUE ET CRISTALLOCHIMIQUE DES GELS ALUMINOSILICIQUES

Introduction

Dans un travail antérieur l'un de nous a été amené à analyser le problème de l'altération exogène dans son ensemble et à énumérer les différents paramètres ou caractéristiques du milieu, qui peuvent être considérés comme des facteurs de l'évolution superficielle et qui jouent, de ce fait, un rôle fondamental dans la genèse des phénomènes pédologiques (G. PÉDRO, 1964). Ce sont essentiellement :

1. les paramètres liés au climat ou mieux au pédoclimat de la station considérée. On les a dénommé *thermohydriques* car ils découlent, d'une part des critères de température, d'autre part de la dynamique de l'eau dans le milieu avec toutes sortes de possibilités depuis le drainage continu (lessivage) jusqu'à la stagnation temporaire ou permanente (hydromorphie) ;

2. les paramètres liés au matériau constituant le substratum superficiel et qui sera le siège de l'évolution. Il s'agit classiquement des caractéristiques *pétrographiques*: nature des minéraux constitutifs, composition chimique, structure et constitution cristallochimique, dimension et disposition générale des édifices... ;

3. enfin, les paramètres liés à la végétation et à l'évolution de la litière en fonction des conditions générales de la surface du globe. Ils sont de nature typiquement *physico-chimique* et se traduisent en dernier ressort par l'absence (cas de l'eau pure) ou la présence, au sein des solutions d'attaque, de réactifs bien définis (CO_2, acides organiques hydrosolubles ...).

A la lueur de cette brève analyse, on peut donc distinguer très aisément 3 grands groupes de facteurs d'évolution qui sont totalement indépendants. Aussi, à la fin des présentes recherches, a-t-on été amené à tenter de réaliser la synthèse générale des données expérimentales en nous plaçant de ce point de vue et en considérant successivement l'influence des paramètres hydriques, puis des caractéristiques des matériaux (gels) et enfin des conditions physico-chimiques du milieu, sur la nature et le développement des processus engendrés au laboratoire.

A. — Rôle des paramètres liés aux conditions thermohydriques

Place respective de l'hydrolyse et du lessivage

Comme la température a été maintenue constante dans *tous* les essais (65-70°C), nous n'avons à prendre en considération ici que le facteur lié à la dynamique de l'eau.

Les données essentielles sont à ce propos résumées dans le tableau 24 qui montre immédiatement qu'une évolution des gels n'a pu être obtenue que sous l'effet d'un lessivage. Or ceci nous conduit à faire deux remarques.

1. Les gels aluminosiliciques sont stables au contact de l'eau, quelle que soit leur composition, ce qui veut dire que la mise en solution des éléments constitutifs est toujours très limitée et finalement que le degré d'hydrolyse est faible.

Ainsi, les constituants aluminosilicatés mis en présence de solutions aqueuses sont dans tous les cas *peu hydrolysés*, qu'ils soient sous forme cristalline ou à l'état amorphe.

2. Pour obtenir une évolution de la phase solide, il faut dans ces conditions favoriser l'hydrolyse et déplacer en permanence vers la droite la réaction :

$$\text{Gel X} + H_2O \rightleftarrows \text{Solide Y} + \text{Solution Z}$$

C'est ce que l'on peut réaliser, si l'on est à même d'établir une sorte de *flux* (phénomène dynamique), tel que celui créé par le lessivage : en soutirant continuellement la petite quantité d'éléments mis en solution, ce dernier permet en effet d'assurer le déplacement de l'équilibre d'hydrolyse et de provoquer ainsi une évolution, lente certes mais appréciable à la longue, du gel de départ.

TABLEAU 24

Conditions hydriques	Présence d'un lessivage à l'eau (avec ou sans CO_2)	Sans lessivage
	Drainage continu	Stagnation permanente (hydromorphie)
Évolution géochimique	Désilicification Désalcalinisation Maintien de l'aluminium	Néant
Évolution cristallochimique	Individualisation d'hydroxydes d'aluminium cristallisés (Boehmite-Gibbsite)	Néant

On voit donc que, chaque fois que l'on a affaire à des matériaux stables au contact de l'eau, c'est-à-dire insolubles ou peu hydrolysables, le drainage continu apparaît comme le facteur fondamental et absolument indispensable de l'évolution géochimique et cristallochimique.

Ainsi, se trouve démontré le fait que si l'*hydrolyse*, qui correspond à l'attaque des liaisons SiOAl par les ions H^+ et OH^- de l'eau, constitue le mécanisme primaire de la dégradation des édifices aluminosilicatés amorphes ou cristallisés, c'est le processus de *lessivage* qui permet à l'hydrolyse de se développer et qui apparaît, de la sorte, comme le « vrai moteur » de l'évolution dans les conditions de la surface du globe.

B. — Rôle des caractéristiques liées a la constitution des matériaux

Problème de la stabilité relative des gels amorphes vis-à-vis du processus d'hydrolyse

La présence au départ d'une série de gels amorphes de composition chimique, de constitution cristallochimique et de charge assez variées nous conduit maintenant à procéder à des comparaisons méthodiques entre les données résultant des différents

essais réalisés en conditions de libre drainage. Nous tenterons d'analyser les faits en nous plaçant à deux points de vue :

— tout d'abord, celui ayant trait à la nature géochimique et cristallochimique des phénomènes engendrés ;

— en second lieu, celui relatif à la vitesse de l'évolution et au degré d'altération obtenue.

1. *Types d'évolution géochimique et cristallochimique (aspect qualitatif).*

Les principaux résultats sont récapitulés dans le tableau 25.

TABLEAU 25

Type de gel	A	B	C	D
Groupe	hypersiliceux	hypersiliceux	hyposiliceux	hyposiliceux
Ki	4,5	5,2	5,2	1,8
Caractères liés à la charge	anionique	cationique	cationique	anionique
Teneur en Al^{IV} (%)	68	100	25	55
Évolution par lessivage à l'eau pure	Désilicification $q(SiO_2) > q(Al_2O_3)$			
	Édification de BOEHMITE AlO.OH			
Évolution par lessivage à l'eau carbonique	—	—	Désilicification $q(SiO_2) > q(Al_2O_3)$	
			Édification de GIBBSITE $Al(OH)_3$	

On constate ainsi que, dans les conditions hydrodynamiques des essais, le type d'évolution est le *même* :

— quelle que soit au départ la teneur du matériau en SiO_2,

— quel que soit l'état de coordinence de l'aluminium au sein de constituant aluminosilicaté,

— enfin, quelle que soit la teneur en alcalins, c'est-à-dire que le squelette ait une charge positive ou négative, ou encore qu'il ait un caractère légèrement acide ou basique.

Il y a dans tous les cas une désilicification du gel de départ avec enrichissement en alumine libre. Du point de vue pédologique, l'évolution est donc nettement de type *allitique* et aboutit à l'individualisation d'hydroxydes d'aluminium cristallisés au sein du niveau éluvial.

On retrouve bien dans ces conditions les résultats obtenus au cours de recherches effectuées antérieurement à partir de divers constituants cristallins de la série aluminosilicique, primaires (granites, basaltes ..., G. PÉDRO, 1964) ou secondaires (kaolinite ..., G. PÉDRO et J. BERRIER, 1966).

La nature des matériaux ne semble donc pas intervenir quant à la tendance géochimique de l'évolution. Elle ne paraît pas, non plus, modifier le type de néogenèse engendrée (hydroxydes).

***

Ainsi, un matériau amorphe peut aisément, dans des conditions de libre drainage, évoluer et aboutir à des édifices cristallins. De ce fait, tout conduit à penser que si, dans la nature, l'altération des constituants vitreux et amorphes engendre généralement des allophanes désorganisées ou mal cristallisées, c'est que soit le drainage n'est pas suffisamment intense, soit plus probablement qu'il convient d'envisager l'existence, au sein du milieu, d'un agent indépendant du matériau et qui serve d'inhibiteur à la cristallisation.

2. *Vitesse d'altération, degré d'évolution et rendement des transformations (aspect quantitatif).*

La quantité d'un matériel aluminosilicique, qui est transformé en un temps donné au cours d'une évolution de type latéritique, dépend essentiellement d'une part de la vitesse d'élimination de la silice et d'autre part du comportement de l'aluminium.

Nous allons donc examiner successivement :
— le taux de lessivage pris globalement ;
— l'extraction de la silice ;
— la dynamique de l'alumine ;

et envisager leur variation en fonction de la nature des gels.

a) *Valeur du taux global d'exportation.*

Les résultats exprimés en mg/litre (tabl. 26) permettent de comparer les chiffres moyens obtenus ici avec ceux trouvés antérieurement lors de l'altération expérimentale des roches éruptives (G. PÉDRO, 1964).

TABLEAU 26

Essais à l'eau pure

Constituants de départ		Ki	Taux global d'exportation (mg/l)
Gels	A	3,7	14,6
	B	4,8	39,5
	C	0,9	5,4
	D	1,8	7,6
Roches	granite	8,2	2,0
	basalte	5,4	7,0

On constate ainsi aisément que :

1. le taux d'exportation varie dans de larges proportions (de 5,4 mg/l à 39,5 mg/l) suivant le type de gel, mais qu'il est toujours plus élevé, pour des teneurs en SiO_2 comparables, dans le cas de constituants aluminosiliciques amorphes que pour des minéraux siliceux ou aluminosilicatés bien individualisés ;

2. le taux de lessivage est d'autant plus élevé que le gel de départ est plus riche en silice, alors que dans le cas des roches cristallines, l'exportation est toujours plus forte sur matériaux basiques et moins marquée sur matériaux acides, c'est-à-dire plus siliceux.

Ainsi semble confirmé le fait, qu'à composition chimique similaire, les autres paramètres caractérisant un matériel de départ et en particulier la cristallinité ou la constitution cristallochimique peut jouer un rôle notable dans la réaction des édifices aux phénomènes d'altération.

b) *Élimination de la silice.*

Nous avons vu que, pour tous les essais effectués au cours de ces recherches, on se trouvait en présence d'une exportation préférentielle de silice. Toutefois, une telle élimination semble avoir été plus ou moins influencée par divers éléments caractérisant les gels et en particulier par :

— leur teneur en SiO_2,
— leur caractère « anionique » ou « cationique »,
— enfin, leur constitution cristallochimique (coordinence de l'aluminium).

Teneur en SiO_2 des édifices de départ.

Si l'on considère à ce propos le cas des essais avec lessivage à l'eau pure, l'examen des données rassemblées dans le tableau 11 (p. 308) montre immédiatement que *la silice est d'autant plus fortement entraînée au cours du lessivage que le gel est plus siliceux au départ* (fig. 17) ; (notons en passant que ce résultat confirme la différence de comportement entrevue ci-dessus entre roches cristallines et matériaux amorphes). A la limite, lorsqu'on fait l'expérience avec un gel pur de silice (actigel par exemple), on trouve dans les mêmes conditions (70°C) une valeur encore plus forte et correspondant à une teneur voisine de 200 mg/l de SiO_2 soluble (G. PÉDRO et J. BERRIER).

Autres caractéristiques.

D'après les travaux de J.-J. FRIPIAT (1963), de A. LÉONARD et *al.* (1964) notamment réalisés sur différents gels, deux autres éléments peuvent intervenir quant à la stabilité des matériaux amorphes : *la teneur en cations basiques et le pourcentage d'aluminium tétracoordonné.*

1. D'un côté, en effet, dans les matériaux très siliceux ou renfermant de l'aluminium IV, plus il y a de cations basiques, plus le nombre de liaisons Si—O non pontées, c'est-à-dire libres, est important ; d'où un degré de polymérisation de la silice plus faible et une organisation tétraédrique moins rigide dans le gel (*loc. cit.* LÉONARD). C'est ce qui permet de comprendre que, *pour des compositions aluminosiliciques voisines*, l'extraction de SiO_2 ait été relativement plus importante dans le cas de gels cationiques que pour les gels anioniques.

2. D'un autre côté, la présence d'aluminium tétracoordonné contribue également au relâchement du réseau (*loc. cit.* FRIPIAT). Ainsi plus la teneur en Al^{IV} est importante, plus le réseau sera instable, et par voie de conséquence, la désilicification rapide. La figure 18 montre qu'il en est bien ainsi pour les gels aluminosiliciques utilisés au cours des recherches présentes.

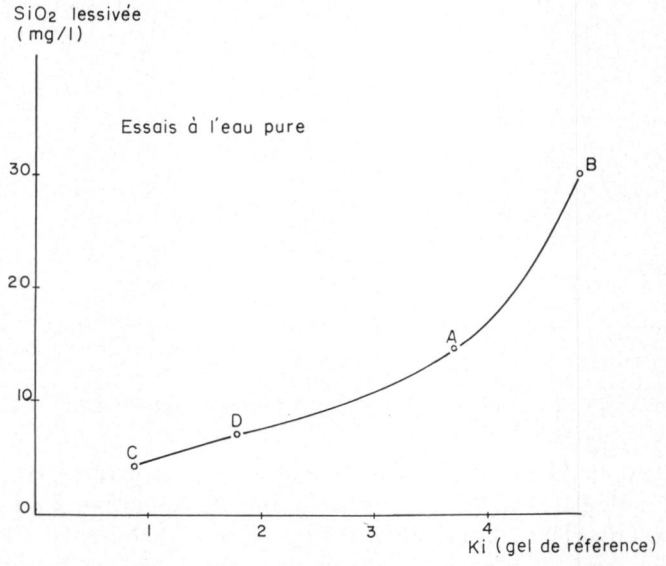


FIG. 17. — *Variation de la teneur en silice des lessivats suivant la composition des matériaux de départ* (essais à l'eau)

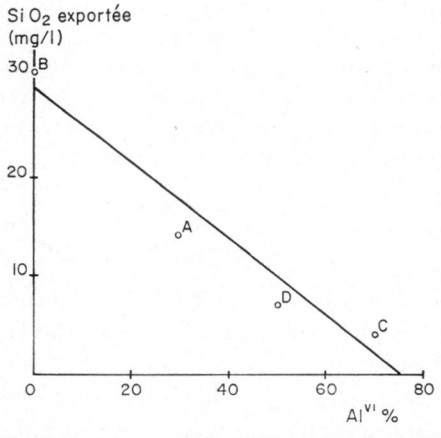


FIG. 18. — *Variation de la teneur en silice des lessivats suivant l'état de coordinence de l'aluminium dans les gels de départ* (essais à l'eau)

Si l'on considère maintenant la désilicification de chacun des gels en fonction du temps (données tabl. 9 et 12, p. 305 et 309), on peut remarquer que, dans tous les cas, on obtient une courbe en S, avec deux phases importantes (si l'on excepte l'en-

traînement mécanique et le lavage du début) comme l'illustre le schéma de la figure 19 : au début l'extraction de la silice est intense (première phase) ; elle diminue par la suite pour devenir nettement plus faible et pratiquement constante, au cours d'une deuxième phase.

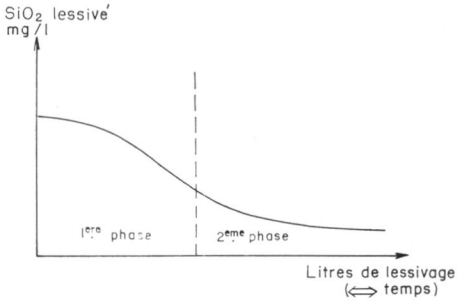


FIG. 19. — *Allure de l'exportation de la silice en fonction du volume de lessivage*

A la lueur des considérations précédentes, on peut concevoir un tel état de choses de la manière suivante :

— au cours de la première phase, la rupture des structures tétraédriques est relativement aisée par suite, d'une part de la simple dissolution des parties entièrement siliciques du gel amorphe, d'autre part de la scission des liaisons Si—O—Al^{IV} qui, comme on le sait, deviennent relativement instables dès que les cations basiques sont éliminés (R. K. ILER, 1955 ; J.-J. FRIPIAT, 1960). C'est effectivement ce qui paraît se produire au début des expériences ;

— à l'opposé, la désilicification devient moins intense dans la deuxième phase des essais où elle ne peut résulter que de la rupture des liaisons Si—O—Al^{VI}. Or celles-ci, qui sont déjà des ébauches de groupements caractérisant les phyllites alumineuses type pyrophyllite, montmorillonite, kaolinite ..., sont naturellement beaucoup plus solides ; elles ne peuvent donc se rompre que très lentement et encore en présence des conditions particulièrement agressives de la latéritisation.

Conclusions.

Le rôle de la nature du matériau au cours de l'évolution expérimentale en conditions de libre drainage et plus spécialement vis-à-vis de la désilicification peut se résumer de la façon suivante :

— la désilicification est plus importante dans le cas d'un gel siliceux *pur* que pour un gel *mixte* aluminosilicique.

Vis-à-vis des phénomènes d'hydrolyse, un constituant *amorphe* aluminosilicaté est donc plus stable qu'un matériau strictement siliceux ; il est même d'autant plus stable que la teneur en SiO_2 est moins élevée.

— En outre, dans le cas de gels aluminosiliciques, la désilicification est d'autant plus aisée que Al est sous forme *tétra*coordonnée et que le matériau contient plus de cations alcalins.

On peut finalement résumer la stabilité des édifices amorphes mis en présence d'un lessivage par la séquence suivante :

augmentation de la stabilité hydrolytique

$$\xrightarrow{\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad}$$

$$Si—O—Si < Si—O—Al^{IV} < Si—O—Al^{VI} < Al^{VI}—O—Al^{VI}$$

L'hydrolyse croît ainsi de droite à gauche ce qui tend à montrer que les gels mixtes caractérisés par l'existence d'hétéropolyanions aluminosiliciques correspondent à des acides *plus forts* que les gels polysiliciques (isopolyanions).

Or, c'est là un résultat qui, s'il peut paraître surprenant à première vue, est en réalité tout à fait conforme aux règles classiques concernant la force respective des iso- et hétéropolyacides.

c) *Dynamique de l'aluminium.*

D'une façon générale nous avons vu que l'aluminium s'est accumulé *in situ* au cours de l'évolution expérimentale. Cependant, dans certains essais, une fraction non négligeable d'Al_2O_3 a pu être lessivée avec les eaux de drainage.

Si l'on examine le tableau 27, on constate par exemple que, lors des essais à l'eau pure, les gels « anioniques » (A et D) se sont très peu appauvris en aluminium tandis qu'un gel « cationique » tel que B a pu en perdre relativement beaucoup. Il nous faut donc examiner ici quels sont les facteurs intrinsèques qui ont pu intervenir dans ce cas sur le comportement de l'aluminium.

TABLEAU 27

Essais	Al_2O_3 lessivé en % de Al_2O_3 contenu dans le gel de référence	Teneur moyenne en Al_2O_3 par litre de lessivage (mg)	pH moyen dans le manchon extracteur
A	2,53	0,22	5,5
B	46,60	5,87	6,5
C	4,32	0,75	7,0
D	0,65	0,11	5,0

Rôle de la teneur en bases. — La présence de cations basiques tels que Na doit avoir une certaine influence sur le comportement de l'aluminium puisqu'on sait que dans le domaine alcalin, Al peut apparaître sous forme d'anion soluble hydroxyaluminate $[Al(OH)_4]^-$: or c'est ce qui effectivement ressort de l'étude de l'évolution du gel C. Comme le montre la figure 20, il existe en effet un certain parallélisme entre l'exportation des ions Na^+ et l'évacuation de l'aluminium ; celle-ci a été importante au cours des premières phases (forte extraction du sodium et pH élevé), puis s'est abaissée régulièrement pour s'annuler pratiquement à la fin de l'essai.

La relation semble donc assez nette.

Rôle de la teneur initiale en Al tétracoordonné. — Les proportions en Al^{IV} et Al^{VI} ont également leur influence :

— celle-ci est négligeable pour les gels « anioniques » (A-D), puisque le lessivage de l'aluminium a toujours été très faible. Il semble donc bien que, dans ce cas, l'aluminium tétracoordonné du gel se transforme rapidement au cours de l'hydrolyse sous une forme hexacoordonnée qui précipiterait sur place immédiatement ;

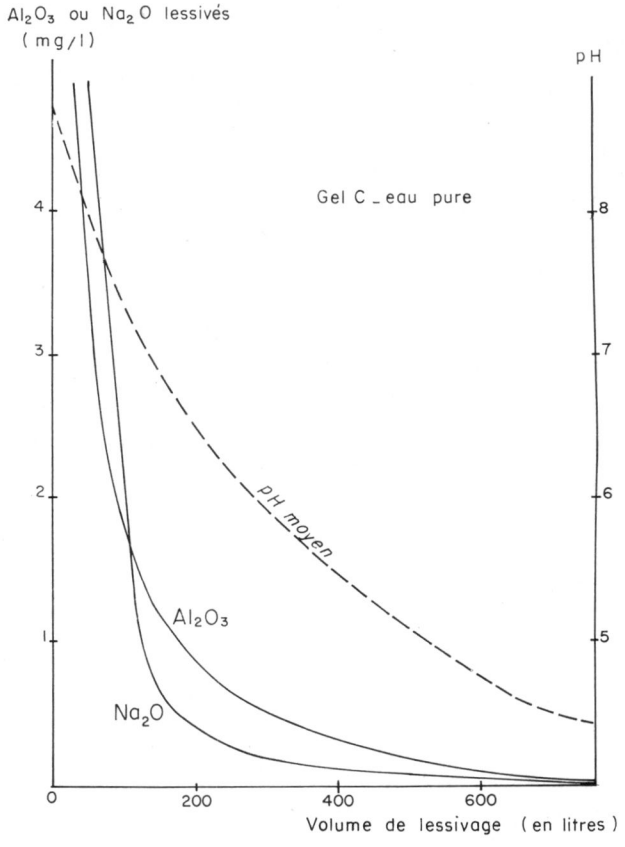


FIG. 20. — *Exportation de l'alumine et du sodium en fonction du volume de lessivage* (cas du gel C)

— par contre, dans le cas des gels « cationiques », où l'exportation de l'aluminium a toujours été notable, il est aisé de constater que cette élimination a été d'autant plus forte que la teneur en Al^{IV} était plus élevée dans le gel de départ. On a par exemple :

$$q(\mathrm{Al})_B > q(\mathrm{Al})_C$$

***

En conclusion, la nature du gel semble jouer un certain rôle quant au comportement de l'aluminium. On comprend, dès lors, que celle-ci arrive à influencer le

« rendement géochimique » de l'évolution expérimentale, que l'on peut définir par exemple de la façon suivante :

C'est la proportion d'Al_2O_3 qui s'est maintenue sur place à l'état libre (*1*), évaluée par rapport à la quantité totale d'alumine extraite (*2*) du gel amorphe au cours de l'évolution,

soit $$\frac{Al_2O_3 \text{ cristallisée} + Al_2O_3 \text{ amorphe}}{Al_2O_3 \text{ cristallisée} + Al_2O_3 \text{ amorphe} + Al_2O_3 \text{ lessivée}}$$

ce qui correspond à

$$\frac{Al_2O_3 \text{ extraite} - Al_2O_3 \text{ lessivée}}{Al_2O_3 \text{ extraite}}$$

La teneur en Al_2O_3 cristallisée est connue (données thermogravimétriques — tabl. 28, colonne 1), de même Al_2O_3 lessivée (dosages dans le ballon — tabl. 28, colonne 1). Par contre la totalité de Al_2O_3 extraite est pour l'instant inconnue, car la quantité d'Al_2O_3 maintenue à l'état amorphe ne peut être mesurée directement.

On pourra cependant évaluer la quantité totale d'alumine extraite, si l'on admet une sorte de « dissolution » du gel, c'est-à-dire la relation :

$$\frac{\text{Poids total } SiO_2 \text{ extraite (lessivée)}}{\text{Poids total } SiO_2 \text{ gel départ}} = \frac{\text{Poids total } Al_2O_3 \text{ extraite (lessivée ou maintenue)}}{\text{Poids total } Al_2O_3 \text{ gel départ}}$$

ou encore :

$$\frac{SiO_2 \text{ extraite}}{Al_2O_3 \text{ extraite}} = \frac{SiO_2 \text{ gel départ}}{Al_2O_3 \text{ gel départ}} = \frac{ki}{1{,}7}$$

d'où :

$$\text{Poids total (théorique) } Al_2O_3 \text{ extraite} = \frac{\text{Poids total } SiO_2 \text{ lessivée (connu par dosage)} \times 1{,}7}{\text{Ki gel départ}}$$

TABLEAU 28

Essais à l'eau pure	Al_2O_3 lessivée (g) (1)	Al_2O_3 libre cristallisée (g) (2)	Al_2O_3 extraite (théorique) (g) (3)	Rendement « géochimique » (%) (4)
A	0,2	5,3	6	96,7
B	2,7	1,8	5	46,0
C	0,6	6,1	5,7	89,5
D	0,1	3,1	5,9	98,3

(*1*) Al_2O_3 sous forme d'hydroxyde cristallisé + Al_2O_3 à l'état d'hydrate amorphe ; autrement dit : Al_2O_3 extraite-Al_2O_3 lessivée (Al_2O_3 combinée n'intervient donc pas dans ces calculs).

(*2*) Al_2O_3 lessivée + Al_2O_3 libre.

On voit finalement d'après les résultats du tableau 28 que le rendement géochimique est, dans tous les cas, bon ($\geqslant$ 90 p. 100), sauf pour l'essai B où il représente à peine plus de 45 p. 100. La quantité totale d'Al_2O_3 extraite en B a bien été, comme on l'a vu, très importante, mais comme plus de 50 p. 100 de cette alumine extraite ont été lessivés, le résultat global est à peine moyen.

En définitive, la teneur en silice des gels amorphes aluminosiliciques ne paraît pas influer, d'une façon générale, sur le rendement d'une évolution de type allitique; par contre, l'existence exclusive d'aluminium tétraédrique et la présence de cations alcalins peuvent abaisser nettement ce rendement en favorisant l'exportation de l'aluminium.

Ainsi, la nature des gels amorphes, si elle ne joue pratiquement aucun rôle quant au type géochimique de l'évolution, intervient tout de même assez nettement sur le plan des phénomènes quantitatifs en influençant le rendement des transformations.

C. — Rôle des caractéristiques physico-chimiques des solutions d'altération

Conditions de formation des hydroxydes d'aluminium.

Il s'agit maintenant de comparer, dans le cas des essais réalisés en milieu lessivé sur les gels C et D, les effets obtenus sous l'action des deux réactifs d'altération utilisés au cours de ces recherches :

— l'eau pure (pH = 6,4) d'une part ;

— l'eau chargée d'un acide faible type CO_2 (solution N/100 environ — pH 4,5) d'autre part.

Ce problème sera envisagé successivement d'un point de vue géochimique, puis cristallochimique.

1. *Évolution géochimique*

— Si l'on considère tout d'abord la *tendance évolutive*, un simple examen du tableau 25 (p. 330) montre que, pour les 2 gels mis en œuvre, celle-ci a été du même type *que l'on soit ou non en présence de CO_2.*

L'évolution se traduit en effet dans tous les cas par la relation :

$$q(SiO_2) > q(Al_2O_3)$$

avec accumulation préférentielle d'aluminium et individualisation d'Al_2O_3 libre sous la forme d'hydroxydes. On retrouve ainsi les résultats obtenus précédemment à partir de roches cristallines (G. PÉDRO, 1964).

C'est là d'ailleurs un comportement tout à fait normal, les solutions carboniques n'étant pas suffisamment acides (pH = 4,5) pour provoquer une extraction et une élimination quelque peu importante de l'aluminium en dehors du milieu éluvial, et par voie de conséquence, pour modifier le sens de l'évolution.

— Sur le plan maintenant du *degré de l'altération*, il faut, ici encore, considérer le problème par l'intermédiaire de la dynamique de la silice.

Comme le montrent les données relatives à la composition du litre de lessivage (tabl. 17, p. 31), la présence de gaz carbonique permet d'accroître l'exportation de silice. C'est ce qui apparaît, aussi nettement, sur la figure 21 relative à la variation du Ki des reliquats C lors du lessivage avec ou sans CO_2.

La désilicification des gels comme celle des roches (G. PÉDRO, 1964) est donc plus

forte sous l'action des solutions carboniques qui étant plus acides que l'eau favorisent, dans tous les cas, le processus d'hydrolyse.

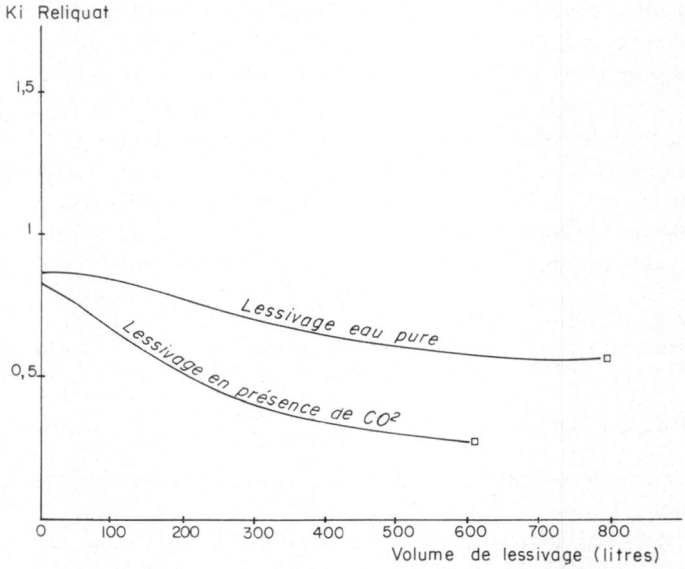


FIG. 21. — *Abaissement du rapport SiO_2/Al_2O_3 dans les reliquats C évoluant en présence d'eau pure ou sous atmosphère de CO_2*

En conséquence la mise en œuvre d'un réactif à caractère acide faible, tel CO_2, n'a pas modifié la tendance géochimique de l'évolution ; elle a, par contre, provoqué *une augmentation notable de l'hydrolyse et,* par là même, du degré de l'altération.

2. *Évolution cristallochimique : individualisation des hydrates d'alumine*

a) *Nature des hydroxydes de néogenèse.*

Les néoformations obtenues au sein des reliquats qui correspondent, suivant la terminologie de G. MILLOT (1964) à des *néogenèses par soustraction,* portent essentiellement sur l'aluminium et se traduisent par l'individualisation, au sein du reliquat, d'hydroxydes purs et bien cristallisés.

Mais, comme nous l'avons déjà constaté, la nature de l'hydroxyde formé peut être différente et semble liée plus spécialement aux conditions physico-chimiques qui caractérisent le milieu d'évolution dans les divers essais : lessivage avec ou sans gaz carbonique (fig. 12 et tabl. 25).

1. Lors du lessivage à l'eau pure (gels A, B, C et D) on aboutit, dans tous les cas, à l'individualisation de boehmite, γ AlO.OH (*mono*hydrate), qui est d'ailleurs bien cristallisée et qui ne rappelle en aucune façon (cf. fig. 12) la « pseudoboehmite » obtenue souvent lors des expériences de maturation réalisées en présence des solutions mères.

Le même oxyhydroxyde a donc été obtenu :

— quelle que soit la teneur originelle du gel en SiO_2.

— quelles que soient les proportions d'Al^{IV} et d'Al^{VI} ou, en d'autres termes, quelle que soit la coordinence de l'aluminium au sein du gel de départ (B par exemple n'avait pas d'Al^{VI}).

— enfin, quel que soit le type ionique qui caractérise le matériel initial.

Ainsi l'apparition de boehmite semble simplement résulter, d'une part de la *désionisation* du matériel de départ (élimination des ions Cl^-, NO_3^- ou Na^+ gênant tout arrangement cristallin), d'autre part de la *désilicification* qui provoque la libération progressive de l'aluminium par rupture des liaisons et démixtion du système (Si-Al).

2. A l'opposé, le lessivage en présence d'eau carbonique (gels C et D) provoque la genèse de *gibbsite* : $Al(OH)_3$ (*tri*hydrate) dans les 2 essais, c'est-à-dire quelle que soit la teneur en SiO_2 ou le caractère ionique du matériau de départ.

L'évolution cristallochimique a donc été nettement différente, pour des gels identiques et des conditions thermohydriques analogues, suivant les agents de l'altération :

Eau pure :	Monohydrate Al_2O_3, H_2O Forme oxyhydroxyde ou métahydroxyde γ AlO.OH	Boehmite
Eau carbonique :	Trihydrate Al_2O_3, $3H_2O$ Forme orthohydroxyde $Al(OH)_3$	Gibbsite

c'est-à-dire finalement suivant l'ambiance physico-chimique imposée par les solutiins d'attaque.

On est alors amené à se demander pourquoi CO_2 a pu jouer un rôle si caractéristique quant au type d'hydroxyde d'aluminium engendré expérimentalement.

b) *Essai d'interprétation.*

Si l'on compare systématiquement les conditions physico-chimiques des divers essais réalisés d'une part avec l'eau pure, d'autre part au contact de CO_2, il apparaît aussitôt que :

— le milieu d'attaque carbonique est plus acide (pH = 4,5) que le milieu strictement hydrolytique (pH = 6,4) ;

— les caractères physico-chimiques *intrinsèques* des gels de départ importent peu puisque, pour des conditions données, ceux-ci conduisent de toute façon à des néogenèses de même type ;

— dans le cas de constituants aluminosiliciques de même nature, la désalcalinisation est toujours plus brutale sous atmosphère de CO_2 que dans les essais à l'eau pure.

Ainsi, en ne faisant appel qu'à des données physico-chimiques classiques, on est amené à dire qu'en milieu lessivé à caractère « latéritisant », la gibbsite s'est développée en présence de pH plus acides et au contact de solutions moins riches en cations alcalins que la boehmite.

On peut tenter d'interpréter un tel état de choses, si l'on considère les hydrates cristallisés comme des polymères de charge O produits par condensation d'ions définis existant en solution vraie ou en pseudosolution (R. P. GRAHAM et A. W. THOMAS, 1947). Ainsi l'orthohydroxyde $Al(OH)_3$ se présente comme un polymère « hydroxyaluminique », tandis que la boehmite AlO.OH constitue une sorte de « polymère oxyhydroxyaluminique ».

— Or, il est bien connu aujourd'hui que les grouges *aquo* coordinés aux éléments en solution (généralement en milieu acide) sont plus ou moins ionisables suivant les conditions de pH : l'expulsion des protons des molécules d'eau au fur et à mesure

de l'alcalinisation du milieu constitue, en effet, un mécanisme classique que l'on appelle, depuis les travaux de BRONSTEDT, « hydrolyse des ions ».

En ce qui concerne l'aluminium par exemple, on a d'après L. PAULING (1953), entre pH 0 et 14, la série suivante :

$$[Al(H_2O)_6]^{3+}\ [Al(OH)(H_2O)_5]^{2+}\ [Al(OH)_2(H_2O)_4]^{+}\ [Al(OH)_3(H_2O)_3]\ [Al(OH)_4(H_2O)_2]^{-} \xrightarrow[pH]{}$$

Certes, pour un pH donné, il n'existe pas une seule forme ionique ; on peut dire néanmoins qu'il y a, dans tous les cas, prédominance d'un des ions hydroxo comme cela est indiqué sur le diagramme pH — concentration (de la figure 22, d'après J. VAN SCHUYLENBORGH, 1965).

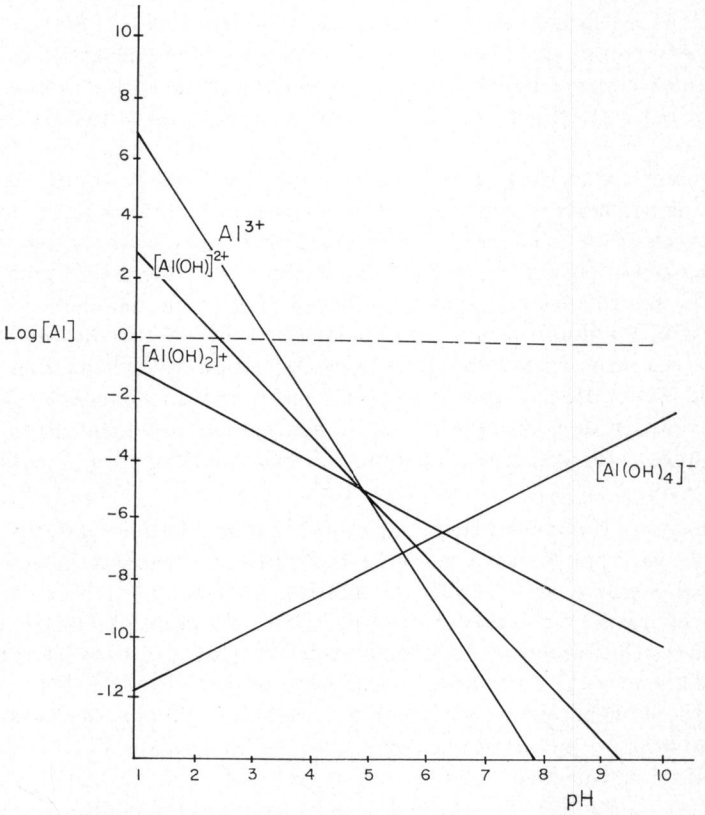


FIG. 22. — *Diagramme pH-concentration de l'aluminium* (25°C) *d'après* J. VAN SCHUYLENBORGH (1965)

On constate dans ces conditions et pour des milieux *dilués* que :

— en dessous de pH = 6, les formes cationiques sont de loin les plus importantes ; ce serait donc le cas, par exemple, pour les essais en présence de CO_2,

— alors qu'en dessus de pH = 6,2, c'est l'anion hydroxo $[(Al(OH)_3]^-$ qui tend à prédominer ; cette situation serait alors celle des expériences réalisées sous l'action de l'eau pure.

— Mais, d'un autre côté, on sait maintenant que les ions hydroxylés ne se condensent pas de la même manière suivant leur charge :

— ainsi, les *cations* hydroxo se polymérisent simplement, *sans déshydratation*, par l'intermédiaire des ions OH qui ont une forte tendance à la coordination par suite de l'existence de 3 paires d'électrons disponibles ; c'est le processus d'*olation* avec formation de liaison *ol* (P. SOUCHAY, 1963). Un *ortho*hydroxyde comme la gibbsite $Al(OH)_3$ s'édifierait de la sorte par un processus continu d'olation à partir de cations basiques ;

— par contre, les *anions* hydroxo ne se condensent que par l'intermédiaire de réactions de déshydratation, qui provoquent l'établissement de liaisons par *mise en commun d'atomes d'oxygène* (liaison *oxo*) ; les composés polymérisés sont alors simultanément oxy- et hydroxylés. C'est donc par un procédé de ce genre que l'on peut imaginer l'individualisation des monohydrates de sesquioxydes et de la boehmite en particulier ; notons d'ailleurs, en passant, que les oxyhydroxydes correspondent effectivement à la forme déshydratée du composé neutre de constitution $[Al(OH)_4]$ H, qui n'est autre que l'acide théorique, désigné autrefois sous le nom d'acide métaaluminique.

A la lueur de cette série d'éléments, on peut dire finalement que l'apparition de gibbsite ou de boehmite en fonction des caractéristiques physico-chimiques du milieu lessivé n'est pas autre chose que *la traduction, pour la phase solide en voie d'édification, de l'état d'hydrolyse des ions Al en solution*, état qui est, comme on l'a vu, essentiellement sous la dépendance des conditions de pH. C'est donc uniquement, semble-t-il, en créant un milieu plus acide que celui constitué par l'eau naturelle que CO_2 a permis, au cours de ces recherches d'aboutir à la néoformation de gibbsite. Les expériences d'A. HERBILLON et M. C. GASTUCHE (1962) confirment d'ailleurs cet état de choses, puisque l'évolution de gels aluminiques, au cours d'un traitement physique de type acide telle que la « dialyse » les a conduit à l'édification exclusive de gibbsite (trihydrate).

Remarque. — Il convient de signaler que le milieu d'individualisation de la boehmite semble correspondre ici à des valeurs de pH relativement basses (6 environ) lorsqu'on les compare, soit à celles caractérisant le domaine d'apparition des ions $[Al(OH)_4]^-$ et qui sont consignées dans les traités courants de chimie, soit à celles correspondant à la formation des composés de type AlO.OH dans les expériences de maturation en présence de solutions alcalines concentrées (P. H. HSU, 1967). Mais, il ne faut pas oublier, comme cela a été déjà rappellé, que nous sommes en présence d'un milieu *dilué* et que, dans ces conditions, la limite $[Al(OH)_3]$—$[Al(OH)_4]^-$ est repoussée systématiquement vers les zones plus acides (cf. fig. 22). En outre, il y a ici une seconde raison, liée au fait que les essais n'ont pas été réalisés à la température ambiante, mais à une température voisine de 70°C ; or le domaine d'existence de l'hydrate $Al(OH)_3$ est déplacé, de la même façon, vers la gauche de l'échelle des pH au fur et à mesure de l'élévation de température (cf. fig. 23, d'après L. L. PERCHUK, 1964).

On constate, en définitive, qu'à un pH donné, il peut s'édifier soit de la gibbsite, soit de la boehmite suivant la concentration de la solution et la température du milieu. La boehmite aura ainsi d'autant plus de chance d'apparaître que le milieu est plus dilué et surtout que la température est plus élevée.

Indirectement, la température paraît donc pouvoir jouer un certain rôle quant

au type d'hydroxyde d'aluminium engendré au cours de l'évolution expérimentale des constituants aluminosilicatés.

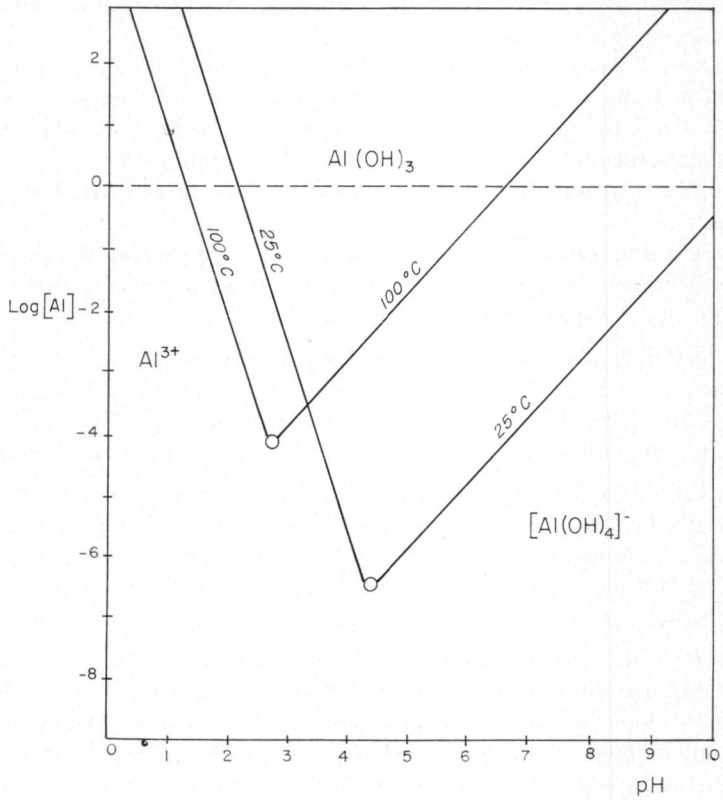


FIG. 23. — *Influence de la température sur le diagramme pH-concentration dans le cas de l'aluminium d'après* L. L. PERCHUK (1964)

IV. — CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Cette étude expérimentale, consacrée à l'évolution géochimique et cristallochimique de quelques gels aluminosiliciques amorphes en milieu lessivé, avait pour but essentiel de compléter la série de travaux antérieurs effectués dans les mêmes conditions à partir de roches cristallines aluminosilicatées (G. PEDRO, 1964). Or, elle a conduit à des résultats similaires, ce qui permet de généraliser les premiers enseignements tout en les précisant :

1. les paramètres *hydriques* (la température ayant été maintenue constante dans tous les essais) semblent bien constituer les facteurs primordiaux de l'altération.

a) Le degré d'hydrolyse étant faible, l'évolution est nulle en milieu stagnant (hydromorphie) et ne peut se développer qu'en présence d'un renouvellement permanent des solutions d'attaque (drainage libre). Le lessivage apparaît donc comme le « vrai moteur » des phénomènes d'altération à la surface du globe.

b) Pour des conditions physico-chimiques données, la *nature* de l'évolution engendrée du point de vue géochimique et cristallochimique (siallitisation, allitisation par exemple) est la même quelle que soit le type de matériau mis en expérience et ne dépend que de *l'intensité* du lessivage.

Ainsi, *sous l'action d'un drainage chaud et abondant,* il y a dans tous les cas, au contact de l'eau pure ou de l'eau carbonique, rupture complète de la liaison Si-O-Al des constituants aluminosiliciques, soustraction de la silice du niveau éluvial, changement de l'état de coordinence de l'aluminium ($Al^{IV} \rightarrow Al^{VI}$) et individualisation *in situ* d'alumine libre sous forme d'hydrates cristallisés (boehmite — gibbsite).

L'allitisation reproduite ici constitue de la sorte un processus *dominant,* et indépendant de la nature de la roche mère ; dans le langage des pédologues, on pourrait donc dire qu'elle est typiquement un phénomène *zonal.*

2. A l'intérieur d'un domaine de pH bien déterminé, les caractéristiques *physico-chimiques* ne jouent pratiquement aucun rôle quant au type géochimique de l'évolution. Mais, l'étude effectuée à partir des gels montre qu'elles sont à même, par contre, d'intervenir directement sur la nature des édifices de néoformation :

— ainsi, dans les conditions expérimentales, la présence de CO_2 conduit à un milieu légèrement acide (pH voisin de 4,5), qui correspond à une prédominance de cations hydroxyaluminium, d'où une possibilité de polymérisation par simple coordination des ions OH (liaisons *ol*) et édification de l'orthohydroxyde $Al(OH)_3$ à l'état de gibbsite par un mécanisme d'olation ;

— inversement, pour les mêmes conditions thermohydriques, l'action de l'eau pure se produit en milieu moins acide (pH de l'ordre de 6,5), c'est-à-dire à un pH pour lequel les anions hydroxyaluminate $[Al(OH)_4]^-$ deviennent abondants. La condensation qui se ferait alors par mise en commun d'oxygènes et déshydratation (liaison *oxo*), aboutit de ce fait à des produits simultanément oxy- et hydroxylés de type oxyhydroxyde, qui se sont individualisés ici à l'état de boehmite.

3. Quant aux paramètres liés à la *constitution intrinsèque des matériaux,* nous avons vu qu'ils n'exerçaient, dans les conditions des expériences, pratiquement aucune influence sur la nature géochimique et cristallochimique de l'évolution. Par contre, ils interviennent quant à la vitesse des phénomènes engendrés qui dépend, elle, essentiellement de la plus ou moindre grande stabilité hydrolytique des édifices. De ce point de vue, les gels artificiels constituent un matériel de choix puisqu'on est relativement maître de leur composition, de l'état de l'aluminium, de leur caractère ionique ... Ainsi, cette étude expérimentale a montré par exemple que, dans le cas des matériaux amorphes, les constituants aluminosilicatés étaient plus stables vis-à-vis des phénomènes d'hydrolyse que les produits siliceux et conduit à proposer une séquence du type :

$$\underset{\text{augmentation du degré d'hydrolyse}}{\text{Si-O-Si} < \text{Si-O-Al}^{IV} < \text{Si-O-Al}^{VI} < \text{Al}^{VI}\text{-O-Al}^{VI}} \quad \leftarrow$$

qui montre en définitive que tout se passe comme si les gels mixtes correspondant à des hétéropolyanions aluminosiliciques possédaient un caractère d'acides plus forts que les gels purs à isopolyanions siliceux. Mais il s'agit là d'un aspect du pro-

blème de l'altération tout à fait nouveau qui demande, en conséquence, à être précisé au cours de recherches expérimentales ultérieures.

Reçu pour publication en février 1968.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier M. S. HÉNIN pour les précieux conseils qu'il leur a donnés tout au long de la réalisation de ce travail, M. J.-J. FRIPIAT pour les mesures de coordinence de l'aluminium en fluorescence X qu'il a bien voulu réaliser à Louvain et J. CHAUSSIDON pour les déterminations de surface qui ont pu être effectuées à Versailles en utilisant la méthode B. E. T.

SUMMARY

GEOCHEMICAL STUDIES OF THE EVOLUTION OF ALUMINOSICILIC GELS AND GENESIS OF ALUMINIUM HYDROXIDES UNDER DRAINAGE CONDITIONS

A range of artificial aluminosilic gels, corresponding to $\frac{SiO_2}{Al_2O_3}$ ratios of 1, 2, 4.5 and 5.2, were subjected to various treatments in the laboratory, as follows :

(i) Continuous and intensive lessivage (3 litres/day), at the température of 70°C :

a) using pure water (pH = 6.4) or,
b) water with CO_2 (pH = 4.5) ;

(ii) Maceration in a small volume of pure water at 70°C.

This research conduced to the following results :

1° Lessivage with pure water brings about an intensive desilification of the gels which are thus gradually enriched with alumina. The latter develops as a free hydrate which, in all experiments, crystallized as boehmite Al O.OH ;

2° Lessivage with CO_2-water brought about a similar geochemical development, that is cheifly allitic. However, in this instance, the aluminium appears as a trihydrate Al $(OH)_3$ (Gibbsite) ;

3° Finally, maceration in contact with water induces no development, whether chemical or crystallochemical.

Thus, hydrolysis of aluminosilicate constituents will only develop when undergoing a lessîvage process which appears to be, in such conditions, the real starter of development on the Earth's surface.

ZUSAMMENFASSUNG

UNTERSUCHUNGEN ÜBER DIE GEOCHEMISCHE EVOLUTION VON KIESEL-ALUMINIUMHALTIGEN GELEN UND ÜBER DIE BILDUNG VON ALUMINIUMHYDROXYDEN BEI FREIER DRÄNIERUNG

Eine Serie künstlich präparierter, den Verhältnissen SiO_2 von 1 ; 2 ; 4, 5, und 5, 2 entsprechenden Kiesel-Aluminium-haltiger Gele, wurden während mehrerer Monaten verschiedenen Laboratoriumsbehandlungen unterworfen :

— Ununterbrochenes und intensives Auslaugen (3 l/Tag) bei einer Temperatur von 70°C.
entweder durch reines Wasser (pH = 6,4)
oder durch CO_2-haltiges Wasser (pH = 4,5)

— Einweichung in Anwesenheit einer begrenzten Menger einen Wassers bei 70°C.

An Hand dieser Untersuchungen wurden folgende Ergebnisse erhalten :

— Das mit reinem Wasser durchgeführte Auslaugen verursacht eine rege Abnahme an Kieselsäure der Gele, so dass diese nach und nach mehr an Aluminiumoxyd zunehmen. Letzteres tritt in der Form eines freien Hydrates auf, das bei allen Versuchen als Boehmit Al O. OH. kristallisiert.

— Das Auslaugen mit kohlensäurehaltigem Wasser führt zu einer geochemischen Evolution derselben Art, d. h. von im wesentlichen allitischer Beschaffenheit. Aber das Aluminium sondert sich hier im Zustand des Trihydrates Al $(OH)_3$ (Gibbsit) ab.

— Schliesslich führt die Einweichung in Berührung mit dem Wasser zu keiner Evolution, weder auf dem chemischen, noch auf dem kristallochemischen Gebiet.

Demzufolge entwickelt sich die Hydrolyse der Kiesel-Aluminiumhaltigen Bestandteile nur in Anwesenheit eines Auslaugeprozesses, der unter diesen Bedingungen als der wahre Motor der Evolution auf der Erdoberfläche erscheint.

РЕЗЮМЕ

Изучение геохимической эволюции алюмино-силикатных гелей и образования гидроксидов алюминия в условиях свободного дренажа.

Г. ПЭДРО, Ж. К. ЛЮБЭН.

Серия алюмино-силикатных гелей, искуственного изготовления с соотношением $\frac{SiO_2}{Al_2O_3}$ равным 1; 2; 4; 5 и 5,2, была подвергнута различной обработке в лабораторных условиях :

— Непрерывное, интенсивное вымывание (3 литра воды в день) при температуре в 70 °C : с помощью чистой воды (pH = 6,4), или карбонатной воды (pH = 4,5).

— Вымачивание в ограниченном об'еме чистой воды при температуре в 70 °C.

Получены были следующие результаты :

1. Вымывание чистой водой вызывает интенсивную дессиликацию гелей, которые таким образом обогащаются алюминием, появляющимся в форме свободного гидрата и кристализующимся во всех опытах в виде бёмита AlO.OH.

2. Вымывание карбонатной водой вызывает геохимическую эволюцию того-же типа, то-есть чисто аллитной природы. Но в этом случае алюминий выпадает в форме три-гидрата, — гиббсита $(Al(OH)_3)$.

3. И, наконец, вымачивание в воде не вызывает никакой эволюции, ни в плане химическом, ни кристало-химическом.

Таким образом, гидролиз алюмино-силикатных компонентов может развиваться только при процессах вымывания, которые в этих условиях представляют настоящий двигатель эволюции поверхности земного шара.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AOMINE S., YOSHINAGA N., 1955. Clay minerals of some well drained volcanic ash soils in Japan. *Soil Sci.*, **79**, 349-358.

BIRREL K. S., FIELDES M., 1952. Allophane in volcanic ash soils. *J. Soil Sci.*, **3**, 2-156.

BOSMANS H., FRIPIAT J. J., 1958. Capacité d'échange d'ions et densité de charge de surface des gels SiO_2-Al_2O_3. *Pédologie*, **8**, 184-198.

BOSMANS H., 1966. *Structure des hydroxydes d'aluminium polycristallins* (*Boehmite-Bayerite-Nordstrandite*). 73 p., Thèse, Louvain.

CHUKROV F. V., BERKHINA S. I., ERMILOVA L. P., MOLEVA V. A., RUDNITSKAYA E. S., 1964. Le problème des allophanes (en russe). *Isvestia Ac. Sc. U. R. S. S., Série geol.*, **4**, 3-19.

DE KIMPE C., GASTUCHE M. C., BRINDLEY G. W., 1961. Ionic coordination in aluminosilicic gels in relation to clay mineral formation. *Amer. Mineralogist.*, **46**, 1370-1381.

EGAWA T., 1964. A study on coordination number of aluminium in allophane. *Clay Science Japan*, **2**, 1-7.

FRIPIAT J. J., 1960. Progrès apportés par la chimie de surface à la connaissance des argiles. *Bull. Soc. fr. Ceram.*, **46**, 13-24.

FRIPIAT J. J., 1963. L'état d'organisation des produits de départ et la synthèse des argiles. *1st internation. Clay conf.*, Stockholm, 53-65.

GASTUCHE M. C., HERBILLON A., 1962. Étude des gels d'alumine : cristallisation en milieu désionisé. *Bull. Soc. Chim. fr.*, 1404-1412.

GRAHAM R. P., THOMAS A. W., 1947. The reactivity of hydrous alumina toward acids. *J. Amer. Chem. Soc.*, **69**, p. 816.

HSU PA HO., 1967. Effect of salts on the formation of bayerite versus pseudoboehmite. *Soil Sci.*, **103**, 101-110.

ILER R. K., 1959. *The colloid chemistry of silica and silicates*. Cornell Univ. Press, Ithaca.

LEONARD A., SUZUKI S., FRIPIAT J. J., DE KIMPE C., 1964. Structure and properties of amorphous silicoaluminas. *J. phys. Chem.*, **68**, 2608-2617.

LOWENSTEIN W., 1954. The distribution of aluminium in the tetrahedra of silicates and aluminates. *Amer. Mineralogist.*, **39**, 92-96.

MILLOT G., 1964. *Géologie des argiles*. 499 p., Masson, édit.

MITCHELL B. D., FARMER V. C., MAC HARDY Y. W., 1964. Amorphous inorganic material in soils. *Adv. Agron.*, **16**, 327-383.

PAULING L., 1953. *Chimie générale*, 728 p., Dunod, édit.

PEDRO G., 1964. Contribution à l'étude expérimentale de l'altération géochimique des roches cristallines. *Ann. agron.*, **15**, 2, 3, 4, 344 p.

PEDRO G., 1966. Intérêt géochimique et signification minéralogique du paramètre moléculaire

$$Ki = SiO_2/Al_2O_3$$

dans l'étude des laterites et bauxites. *Bull. Gr. fr. Argiles*, **18**, nouvelle série fasc., **13**, 19-31.

PEDRO G., BERRIER J., 1966. Sur l'altération expérimentale de la kaolinite et sa transformation en boehmite par lessivage à l'eau. *C. R. Acad. Sci.*, **262** D, 729-732.

PEDRO G., BITAR K. E., 1966. Contribution à l'étude de la genèse des sols hypermagnésiens : recherches expérimentales sur l'altération chimique des roches ultrabasiques. *Ann. agron.*, **17**, 611-651.

PERCHUK L. L., 1964. Déplacement du point isoélectrique des oxydes amphotères en fonction de la température ; influence pour la géochimie (en russe). *Geokhimia*, **11**, 1138-1145.

ROSS C. S., KERR P. F., 1934. Halloysite et allophane. *U. S. Geol. Surv. Prof. Paper*, **185**, G, 135-148.

SCHUYLENBORGH J. Van, 1965. The formation of sesquioxydes in soils. *In Experimental Pedology*, a symposium, Nottingham, 113-125.

SOUCHAY P., 1963. *Polyanions et polycations*, 247 p., Gauthier-Villars édit.

WHITE F, MCKINSTRY H., BATES T. F., 1958. Crystal chemical studies by X ray fluorescence. *7th Conf. Ind. App., X ray analysis*, Denver, 239-245.

Ann. agron., 1968, **19** (3), 349-364.

ESSAI D'APPRÉCIATION DU DANGER D'ÉROSION DANS LES VERGERS DE FORTES PENTES EN MOYEN VIVARAIS

J.-P. DEFFONTAINES, F. DE MONTARD
avec la collaboration technique de L. HUMBERT

Service d'Expérimentation et d'Information,
Centre national de Recherches agronomiques, 78 - Versailles

Station d'Agronomie,
Centre de Recherches agronomiques du Massif-central, 63 - Clermont-Ferrand

Institut national de la Recherche agronomique

SOMMAIRE

Une enquête sur les potentialités de production de la pêche dans une région du département de l'Ardèche a permis de constater l'importance des phénomènes d'érosion dans les vergers en pente.

Dans le but d'apprécier le danger d'érosion dans les plantations futures, une étude des facteurs qui favorisent ou limitent le départ de la terre a été entreprise dans les vergers existants. Cette étude a consisté à chercher les relations entre les caractéristiques d'une série de parcelles plantées, telles que la pente, les conditions physiques du sol, l'âge des arbres, le travail du sol, et un indice de l'érosion. Ce dernier a été établi à partir de la différence de profondeur du labour de défoncement qui précède la plantation, mesurée, dans un verger, en deux points répondant à des critères précis. Pour s'assurer que l'expression était bien un indice de l'érosion, il a été vérifié que les relations avec les différents facteurs étaient conformes à celles qui relient ces mêmes facteurs à l'érosion.

L'analyse progressive de variance a permis de mettre en lumière l'influence de la pente et du taux de cailloux en surface.

INTRODUCTION

L'enquête sur les potentialités agricoles des plateaux de Tournon en Ardèche, réalisée en 1965 et 1966 par le Service d'Expérimentation et d'Information de l'I. N. R. A, sur la demande de la Chambre d'Agriculture, avait notamment pour but de rechercher les facteurs techniques et les caractéristiques du milieu physique

qui limitent la production des différentes cultures, particulièrement celle des cultures fruitières (1).

Au cours de l'enquête, l'observation de nombreuses parcelles plantées en pêchers et l'information auprès de certains exploitants, nous ont amené à considérer l'érosion comme un risque important pour l'avenir de la production de la pêche.

En effet, d'implantation récente, le pêcher est venu compléter un système de culture traditionnel de polyculture et d'élevage. Les vergers se sont le plus souvent implantés dans des zones en pente occupées autrefois par des bois de pins ou de châtaigniers, des landes ou des prairies naturelles, sans tenir compte des risques d'érosion, les zones plates étant réservées aux cultures traditionnelles. Étant donné le caractère récent de ces plantations, les exploitants n'ont souvent pas une idée précise de l'importance des effets de l'érosion sur les parcelles, ils ne la perçoivent que dans certaines conditions météorologiques extrêmes, lors d'orages exceptionnels ; le phénomène revêt alors un caractère spectaculaire d'entraînement des sols, de déchaussement des arbres, de ravinement (Photos 3 à 8, p. 362 et suivantes). L'érosion n'est pas toujours aussi brutale : de petites quantités de terre sont emportées à chaque averse de quelque importance et finissent par constituer une grosse perte au bout de quelques années ; on ne prend conscience du danger que lorsque le mal est fait. Or de nombreux vergers arrivent à la fin de la première génération et le problème de replantation va se généraliser ; il a donc paru utile d'étudier l'érosion dans ces parcelles de première génération poure n mesurer l'importance et rechercher les principaux facteurs dont elle dépend.

I. — MÉTHODES

1. *Le phénomène d'érosion*

Les vergers de pêchers de cette région sont maintenus en sol nu pour supprimer toute concurrence dans l'utilisation de la réserve en eau. Des petites ravines se forment fréquemment ; le sol peut être profondément entaillé lors de fortes averses ou d'orages ; par la suite il est difficile de combler parfaitement ce passage d'eau par le travail ordinaire du sol, labours et passages de canadiens : la parcelle présente ainsi une série de dépressions que les eaux empruntent et approfondissent à chaque orage important.

Ces passages d'eau constituent des lignes d'érosion intense à travers les parcelles ; les fortes pentes augmentent l'énergie d'arrachement et d'entraînement des eaux de ruissellement et on peut y observer ces phénomènes d'érosion spectaculaires bien connus des exploitants qui ont souvent été obligés de rapporter de la terre pour rechausser les arbres placés sur le passage de l'eau. Des pertes de terre importantes, quoique moins visibles, peuvent se produire aussi dès les plus faibles pentes.

2. *La méthode de mesure*

Le but de cette étude est de mesurer le danger d'érosion en fonction des différents facteurs qui la favorisent ou la contrarient, de déterminer et de classer ces facteurs par ordre d'importance.

(1) Cf. « Les facteurs techniques de la production de la pêche tardive en Moyen Vivarais ». R. GRAS, J.-P. DEFFONTAINES. *Ann. agron.*, 19, 1968.

Nous devions donc définir une méthode d'évaluation de l'érosion permettant d'étudier le rôle des différents facteurs et choisir des parcelles où cette méthode soit applicable.

La mesure.

On exprime habituellement une érosion par le poids de terre arraché sur l'unité de surface au cours d'une année. Connaissant la densité apparente moyenne du sol en place, on peut, en mesurant l'épaisseur de sol perdue depuis la plantation du verger, calculer l'érosion qui s'y est produite. Nous avons cherché à mesurer cette épaisseur de terre perdue.

L'érosion ne se répartit pas également sur toute la superficie d'une parcelle car la lame d'eau érosive qui circule à la surface du sol au moment des averses n'a pas une égale épaisseur sur toute l'étendue. Il est théoriquement possible de faire un bilan des pertes, c'est-à-dire de mesurer l'épaisseur de terre perdue depuis la plantation, en examinant la position du collet des arbres par rapport à la surface du sol. Cette méthode ne peut être retenue car la profondeur du collet au moment de la plantation n'est pas bien définie et peut varier dans des limites assez larges sur une même parcelle ; d'autre part le travail du sol provoque fréquemment la formation de petites terrasses dont la crête correspond à l'alignement des troncs, la profondeur du collet est alors tout à fait modifiée, indépendamment de l'action des pluies. Un autre repère est le *fond du labour de défoncement.* En effet peu avant la plantation, le terrain est préparé par un labour de défoncement de 60 à 80 cm. Le fond du défoncement est aisément repérable par sondage car il est à la limite entre deux matériaux de pénétrabilité, de couleur ou de nature très différentes. Connaissant la profondeur initiale du fond de défoncement en un point donné, on peut théoriquement déterminer l'épaisseur de terre perdue par différence avec la profondeur actuelle mesurée. Pratiquement la profondeur initiale du fond de défoncement est mal définie pour une parcelle donnée car le terrain n'offre pas la même résistance à la charrue sur toute l'étendue de la parcelle ; de plus elle varie beaucoup d'une parcelle à l'autre car elle dépend des caractéristiques du tracteur et de la charrue employés et de la surcharge utilisée.

Nous avons donc renoncé à une mesure directe des pertes de terre. Par contre, utilisant la facilité du repérage de la limite de l'horizon défoncé nous avons comparé, selon des règles précises, la profondeur actuelle du fond de défoncement en plusieurs points d'une même parcelle. Les différences observées nous ont permis de calculer un indice d'érosion utilisable pour mesurer le danger d'érosion dans une situation donnée.

Dans une parcelle nous considérons une ligne de plus grande pente répondant aux trois conditions suivantes :

1. la pente est constante le long de cette ligne, compte non tenu des accidents de pente créés à intervalles réguliers par l'existence éventuelle de petites terrasses à la hauteur de chaque ligne d'arbres ;

2. la nature du terrain ne varie pas le long de cette ligne. On peut alors considérer que la résistance rencontrée par la charrue défonceuse a été constante en chaque point de cette ligne ;

3. la ligne ne correspond pas à une dépression ou un passage d'eau.

Sur cette ligne nous choisissons deux points A et B (fig. 1), répondant aux deux conditions suivantes :

1° A et B sont suffisamment rapprochés pour que la profondeur initiale du fond de défoncement ait probablement été la même en ces deux points : cette distance varie entre 10 et 16 mètres ;

2° A est situé entre les deux premières rangées d'arbres, en haut de parcelle. On a évité la position au-dessus de la première rangée d'arbres car les labours y créent une dérayure et tendent à rejeter la terre vers le bas sans qu'il y ait apport venant d'une rangée supérieure.

D'autre part la position de A, en haut de parcelle, permet de considérer qu'en ce point il n'y a pas d'apport de terre ; ce qui n'est pas le cas de B situé en contrebas de A.

Nous avons constaté que la profondeur actuelle du fond du défoncement était plus faible en A qu'en B (fig. 1). La différence observée ΔP (BB'-AA') traduit l'action de facteurs de l'érosion. Mais la distance l entre A et B est variable selon les couples A, B (10 à 16 mètres) et a une influence sur la valeur de ΔP. Pour éliminer cette influence nous avons admis que, pour les distances considérées, ΔP était proportionnelle à l ; dans cette hypothèse la grandeur $\Delta P/l$ est indépendante de l · $\Delta P/l$ constitue l'indice d'érosion que nous avons étudié. Il est exprimé en cm/m. Le schéma suivant permet de situer ΔP.

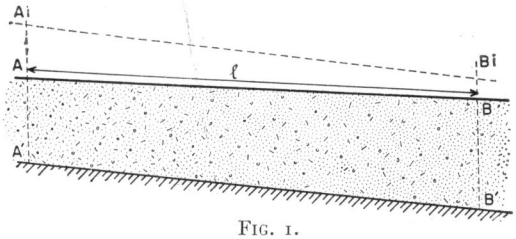


FIG. 1.

Bien que nous n'ayons pu mesurer l'épaisseur réelle de terre perdue, c'est-à-dire l'érosion, ni l'exprimer en fonction de $\Delta P/l$, nous admettons l'hypothèse que $\Delta P/l$, l'indice d'érosion, dépend des mêmes facteurs que l'érosion et varie dans le même sens qu'elle. Nous vérifierons, au vu des résultats, s'il est justifié de faire une telle hypothèse.

L'échantillonnage des parcelles.

Un échantillon de 25 parcelles présentant des fortes pentes comprises entre 15 et 35 p. 100 a été retenu. Nous avons voulu ainsi nous placer d'emblée dans des conditions de pente, favorables à l'observation d'une érosion importante. Une étude plus complète aurait pu inclure les pentes inférieures à 15 p. 100 car en sol nu l'érosion a été observée dès les plus faibles pentes, mais la difficulté de mesure devient grande car l'erreur faite sur la mesure de la profondeur risque d'être du même ordre que ΔP.

Nous avons écarté les parcelles de fortes pentes dont la topographie était trop accidentée pour permettre de trouver des couples de points AB répondant aux conditions désirées.

Enfin, les cas de plantations échelonnées sur 4 ou 5 ans sont fréquents sur la même parcelle : on plante d'abord la partie basse, la première année, et on agrandit ensuite la plantation en remontant la pente dans les années suivantes. Nous avons éliminé les parcelles ayant moins de 4 rangées d'arbres de même âge dans la partie supérieure, de manière à ne conserver que les couples de points AB situés dans une zone de plantation homogène.

3. *Les facteurs de l'érosion examinés dans l'étude*

Dans les vergers, les facteurs susceptibles d'avoir une influence sur l'érosion sont les précipitations, le travail du sol, la pente, des données relatives à la plantation et les caractéristiques physiques du sol. Pour s'assurer que l'indice $\Delta P/l$ traduit bien le phénomène d'érosion, il faut vérifier que les relations de $\Delta P/l$ avec les facteurs précédents sont conformes à celles qui relient les mêmes facteurs à l'érosion.

Les précipitations.

Les relevés journaliers sur une période de 10 ans concernent Saint-Félicien, village situé à 5 km au nord-ouest de la zone étudiée dans des conditions très semblables.

Nous avons admis qu'il existait une forte probabilité d'érosion lorsque la chute journalière dépassait 40 mm, que le danger était moyen entre 25 et 40 mm et qu'il était négligeable en dessous de 25 mm.

Nous avons calculé pour *chaque mois* :

la pluviométrie totale (neige exclue) en mm : a
le nombre de jours où la chute de pluie a dépassé 40 mm : b
le pourcentage des précipitations mensuelles tombées sous forme de pluies journalières supérieures à 40 mm : c
un indice d'agressivité des précipitations mensuelles : $d = b \times c$

TABLEAU I

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
a	60,0	49,0	58,0	67,0	60,0	104,0	56,0	89,0	84,0	97,0	118,0	63,0
b	0,3	0,2	0,2	0,2	0,1	0,7	0,3	0,3	0,7	0,8	0,5	0,3
c	23,0	23,0	9,0	7,0	8,0	34,0	27,0	32,0	55,0	55,0	29,0	29,0
d	6,9	4,6	1,8	1,4	0,8	23,8	8,1	9,6	38,5	44,0	14,5	8,7

L'indice d'agressivité ainsi calculé permet de classer les mois selon les risques décroissants d'érosion :

octobre, septembre, juin, novembre, août, décembre, juillet, etc.

A ces chiffres moyens, il convient d'ajouter le tableau des pluies journalières exceptionnelles. Nous avons choisi la limite de 70 mm, les chutes comprises entre 50 et 70 étant encore nombreuses.

Pluies journalières

Sept.	1956.....	101
Juin	1957.....	78
Oct.	1958.....	87 et 93
Déc.	1958.....	85
Oct.	1959.....	81
Nov.	1959.....	73
Sept.	1960.....	90
Août	1963.....	177
Nov.	1963.....	87 et 81 mm

Les pluies exceptionnelles se situent toutes entre juin et décembre. Il ressort que les orages d'été et les averses d'automne sont les pluies à redouter.

Nous avons admis que les précipitations étaient semblables dans toute la zone étudiée.

Le travail du sol.

Le travail du sol effectué pour l'entretien du verger en sol nu comporte en général un double labour avec chaussement et déchaussement du pied des arbres ; le but poursuivi semble être essentiellement de supprimer par enfouissement l'herbe que ne peut atteindre le canadien, au pied des arbres et sur chaque ligne de plantation ; un deuxième but est d'enfouir du fumier. Le premier labour a lieu le plus souvent à l'automne et le deuxième au début du printemps. Ces labours ont une grosse influence sur le modelé du sol ; ils sont faits en travers de la pente selon la direction des lignes d'arbres et contribuent à créer des petites terrasses (fig. 2) ; leur hauteur varie selon

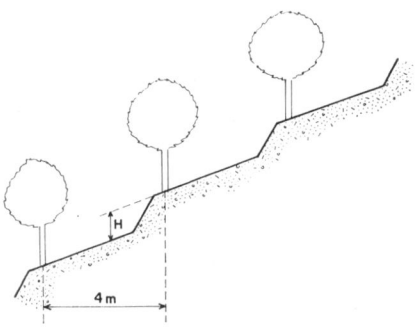


FIG. 2.

l'âge de la plantation et la pente, mais aussi, dans une très large mesure, selon la manière dont sont effectués les labours et les passages de canadiens. Des passages croisés tendent à supprimer ces terrasses ; sur certaines parcelles elles n'apparaissent pas, bien que la plantation soit déjà ancienne et la pente importante.

Depuis le début de la végétation jusqu'à la récolte, le sol est maintenu sans végétation par des passages fréquents de canadien. La fréquence des travaux varie beau-

coup d'une parcelle à l'autre, selon les habitudes de l'exploitant ; elle est modifiée aussi d'une année à l'autre en relation avec les variations de la pluviométrie. En effet, en année humide, les adventices se développent plus rapidement et un plus grand nombre d'interventions est nécessaire pour les supprimer.

Le travail du sol a finalement deux effets :

1° un déplacement progressif des couches superficielles du sol vers le bas de la pente, car chaque particule soulevée a tendance à retomber un peu plus bas, dans le sens de la pente ;

2° une accumulation de terre sous forme de petites terrasses dont la crête se trouve dans l'alignement du tronc des arbres parallèlement au sens du travail.

Par enquête auprès des exploitants nous avons rassemblé les renseignements concernant ces travaux : mode de traction et outils utilisés, nature, modalités et fréquence des façons culturales. Nous avons finalement retenu deux critères pour l'étude de l'influence éventuelle du travail sur l'indice $\Delta P/l$:

1° le nombre de passages de canadien effectués sur la parcelle en année moyenne,

2° la hauteur des terrasses.

La pente.

Nous nous sommes limités aux pentes comprises entre 15 et 35 p. 100, c'est-à-dire, à une gamme où l'érosion a toutes chances d'être importante. La mesure de la pente a été faite pour chaque couple de points A, B, à l'aide d'un appareil simple constitué d'un fil à plomb fixé sur une planchette graduée ; pour la visée, le bord supérieur, rectiligne, est disposé parallèlement au sol dans la direction de la ligne de plus grande pente AB. La valeur de la pente est donnée en pourcentages, à 0,5 p. 100 près.

Les caractéristiques de la plantation.

Nous avons retenu deux caractéristiques de la plantation. La première est l'*âge* ; à mesure que l'âge d'une plantation augmente, l'action cumulée des pluies se traduit par un total de pertes de terre de plus en plus important. L'âge est connu par enquête auprès de l'exploitant. La deuxième est la *surface couverte* par la frondaison des arbres : pendant la période de végétation les couronnes jouent un rôle de protection du sol contre l'impact direct de la pluie et peuvent diminuer son action érosive. On exprime la couverture par le rapport : $\frac{\text{surface couverte}}{\text{surface totale}}$; en pratique, c'est la surface couverte/ha. La couverture est calculée à partir de la densité de plantation et de la dimension moyenne des couronnes déterminées sur 8 arbres pris au hasard dans les 5 premières rangées en haut de parcelle, c'est-à-dire, dans la partie de la parcelle où sont effectués les sondages.

Les caractéristiques physiques du sol.

Pour chaque couple de points A, B, nous avons prélevé un échantillon du sol superficiel pris entre 0 et 10 cm de profondeur. Nous avons déterminé les *textures* au toucher. Le test a été effectué 3 fois par 3 opérateurs différents et a permis de distinguer 4 classes de texture. A chaque classe, nous avons attribué un coefficient : texture sableuse : 1, sablo-limoneuse : 2, limono-sableuse : 3, limoneuse : 4. On peut considérer que le coefficient d'infiltration K est décroissant de la classe 1 à la classe 4.

Nous avons vu que les plantations nouvelles sont établies après un défoncement à 60 ou 80 cm de profondeur. La charrue défonceuse atteint très souvent le granit en décomposition (appelé « gore ») et même des blocs rocheux importants. Ainsi des blocs de tailles et de duretés très diverses sont ramenés en surface, puis émiettés ou cassés au marteau de cantonnier selon leur friabilité jusqu'à obtenir des cailloux de quelques centimètres de diamètre. Il s'en suit que le sol superficiel (horizon 0-10) contient fréquemment une forte proportion de cailloux.

Pour mesurer cette proportion de cailloux dans l'horizon superficiel, nous utilisons un appareil simple ainsi constitué :

— un cylindre en grillage à maille carrée de 2 cm sur 2 cm, fermé à une extrémité par un fond plein en tôle, forme le corps de l'appareil,
— un manchon en tôle s'adapte exactement au contour extérieur du cylindre,
— un couvercle fait du même grillage s'adapte au sommet du cylindre.

Pour effectuer la mesure, les opérations sont les suivantes :

1° on remplit de terre le cylindre entouré de son manchon de tôle, on prélève à la pelle au hasard dans un rayon de 2 mètres autour du point repéré et sur les dix premiers centimètres, en prenant soin de ne pas écarter systématiquement les cailloux. Finalement le contenu du cylindre est un mélange de terre fine et de cailloux, dans les mêmes proportions que dans le sol en place,

2° on enlève le manchon,

3° on place le couvercle,

4° on secoue l'appareil jusqu'au départ total de la terre fine ; tous les cailloux de diamètre supérieur à 2 cm restent dans le cylindre,

5° on met le cylindre en position verticale ; l'épaisseur du lit de cailloux est h et la hauteur totale du cylindre est H ; h/H est le rapport du volume apparent de cailloux sur le volume de terre prélevée. La hauteur de l'appareil correspond à 14 mailles, c'est-à-dire à 28 cm, et on lit simplement le nombre n de mailles remplies par les cailloux.

Le taux de cailloux est $n/14 \times 100$.

En réalité, par ce procédé, on surestime le volume des cailloux : en effet lorsque la terre fine s'est écoulée, de grands espaces vides demeurent entre les cailloux, d'autant plus importants que les cailloux sont gros. On peut remédier à cet inconvénient en étalonnant l'appareil ; pour cela on mesure le volume d'eau déplacée par une certaine quantité de cailloux de grosseur déterminée et on compare au volume mesuré dans l'appareil.

Dans le cas présent, nous avons utilisé directement la mesure donnée par l'appareil.

II. — RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION

1. *Les résultats*

Nous avons considéré la quantité $\Delta P/l$ comme un indice de l'érosion exprimée en cm/m ; nous l'avons mesurée en 80 points situés dans 25 parcelles différentes. Simultanément étaient enregistrées les valeurs des 7 facteurs précédemment décrits.

On construit les graphiques traduisant les relations entre $\Delta P/l$ et chacun des facteurs ainsi que ceux représentant les variations des facteurs pris deux à deux.

Cette démarche permet de déceler des tendances et prépare l'étude statistique, en suggérant certaines transformations ou un traitement spécial d'une partie de l'échantillon et en permettant le repérage et l'analyse des points aberrants ou particuliers.

La méthode des régressions multiples permet ensuite d'exprimer $\Delta P/l$ en fonction des facteurs qui rendent le mieux compte des variations de l'indice $\Delta P/l$, sous forme d'une équation linéaire :

$$\Delta P/l = 0{,}164 + 0{,}022\ P - 0{,}007\ C + 0{,}006\ H \qquad (1)$$

P = pente en p. 100 (significatif au seuil 1 p. 100)
C = taux de cailloux (seuil 1 p. 100)
H = hauteur des terrasses en cm (seuil 5 p. 100).

L'indice d'érosion $\Delta P/l$ est d'autant plus grand que la pente et la hauteur des terrasses sont fortes et que le taux de cailloux est faible. L'indice $\Delta P/l$ devrait

Tableau 2

Matrice des corrélations simples

	$\frac{\Delta P}{l}$	A	P	S.C.	C	T	H	G
G	-0,090	-0,273	- 0,031	-0,449	+0,350	+0,285	- 0,199	1
H	+0,296	+ 0,176	+0,303	+0,084	- 0,212	- 0,074	1	
T	+ 0,065	+0,306	- 0,195	+0,083	-0,060	1		
C	-0,266	-0,365	+ 0,112	-0,334	1			
S.C.	-0,063	+0,524	-0,296	1				
P	+0,265	-0,288	1					
A	+ 0,061	1						
$\frac{\Delta P}{l}$	1							

Matrice des corrélations simples

Coefficient de corrélation significatif au seuil de 1%

Significatif au seuil de 5%

Non significatif

$\frac{\Delta P}{l}$: indice d'érosion — C : taux de cailloux

A : âge — T : nombre de passages de canadien

P : pente — H : Hauteur des terrasses

S. C. : surface couverte — G : textures

s'accroître avec l'âge, or dans le résultat précédent, cette variable n'apparaît pas et la corrélation $\Delta P/l$-âge est très faible. Ceci peut s'expliquer par la relation qui lie l'âge et la pente et qui montre une particularité de l'échantillon étudié.

Nous remarquons en effet dans la matrice des corrélations simples (tabl. 2) une corrélation négative significative au seuil de 1 p. 100 entre l'âge et la pente ; les

plantations les plus anciennes, installées sur des pentes relativement faibles, sont moins susceptibles d'érosion que les parcelles récentes, plantées sur de fortes pentes.

D'une part le total des pertes de terre ne peut que s'accroître lorsque l'âge de la plantation croît, d'autre part dans l'échantillon étudié, plus l'âge des plantations est grand, plus l'érosion est faible : ces deux rôles opposés du facteur âge permettent d'expliquer son absence dans l'équation (1).

2. *Interprétation et discussion*

L'étude des variations de $\Delta P/l$ permet de préciser le rôle particulier des facteurs autres que la pluie, sous des conditions météorologiques semblables pour toutes les parcelles.

L'équation (1) est valable pour des pentes variant entre 15 et 35 p. 100,
un taux de cailloux variant entre 0 et 60 p. 100,
une hauteur de terrasses variant entre 0 et 50 cm,
et pour les conditions de cultures de la région, c'est-à-dire labours et maintien en sol nu.

Les indices $\Delta P/l$ mesurés varient entre 0 et 2,1 cm/m
la moyenne est : 0,73
l'écart-type est : 0,55.

La pente

La pente P a une influence positive hautement significative sur l'indice d'érosion ; celui-ci augmente quand la pente croît.

Nous avons vu la corrélation négative pente-âge (seuil 1 p. 100) ; au cours des années, les terrains disponibles pour la plantation se trouvent dans les classes de pentes de plus en plus fortes.

La liaison négative pente-surface couverte (seuil 1 p. 100) peut s'expliquer par la liaison négative (seuil 1 p. 100) âge-pente et la liaison positive (seuil 1 p. 100) âge-surface couverte.

La liaison pente-hauteur des terrasses (1 p. 100) montre que plus la pente est forte plus les terrasses sont élevées ; ce qui est confirmé par le témoignage des exploitants.

La pente n'est pas en relation avec le taux de cailloux ni avec la fréquence du travail : l'exploitant ne se laisse pas entraver par les pentes fortes pour entretenir son verger.

Les cailloux.

La proportion de cailloux dans l'horizon superficiel a une influence négative hautement significative sur l'indice d'érosion. Celui-ci diminue quand le taux de cailloux croît. Ce fait est important ; si les cailloux ramenés en surface par le labour de défoncement sont défavorables à l'alimentation en eau des arbres [1] et rendent plus difficile les travaux superficiels, ils sont favorables pour limiter l'érosion.

La proportion de cailloux est en corrélation hautement significative et négative avec l'âge : ce fait traduit sans doute la désagrégation progressive des cailloux sous l'effet conjugué des outils de travail et des agents atmosphériques.

[1] Cf. note page 350.

Par contre, les cailloux de surface ont une action négative (seuil 1 p. 100) sur la surface couverte : la vigueur des arbres diminue s'il y a beaucoup de cailloux apparents en surface (1).

La hauteur des terrasses.

La hauteur des terrasses H a une influence positive significative sur l'indice d'érosion ; ce résultat ne permet pas de conclure. En effet, il peut signifier que plus les terrasses sont importantes, plus l'érosion est grande, mais aussi que les terrasses sont consécutives de l'érosion et que plus elle est forte, plus importante est la dénivellation créée au niveau de la ligne d'arbres, soit naturellement, par suite de la présence des racines, soit par un travail du sol qui accroît la hauteur H.

Intérêt des résultats.

Le modèle mathématique que nous avons étudié permet de calculer un indice d'érosion propre aux conditions climatiques et pédologiques de la région, dans le cadre des techniques actuelles de la culture du pêcher. Cet indice est fonction de la pente, du taux de cailloux de l'horizon superficiel et de la hauteur des terrasses.

Dans le cadre d'un terrain où l'on désire créer une plantation nous pouvons écrire H = 0 et l'équation devient :

$$\Delta P/l = 0{,}164 + 0{,}022\ P - 0{,}007\ C.$$

Prenons quelques exemples :

Cas n° 1 : pente 15 p. 100, sans cailloux	$\Delta P/l = 0{,}494$ cm/m
Cas n° 2 : pente 15 p. 100, avec 50 p. 100 de cailloux	$\Delta P/l = 0{,}144$ —
Cas n° 3 : pente 35 p. 100, sans cailloux	$\Delta P/l = 0{,}934$ —
Cas n° 4 : pente 35 p. 100, avec 50 p. 100 de cailloux	$\Delta P/l = 0{,}584$ —

L'indice d'érosion varie dans des proportions considérables.

L'utilisation de l'indice pour mesurer le danger d'érosion est strictement limitée aux pentes comprises entre 15 p. 100 et 35 p. 100. En dessous de 15 p. 100 il est possible que la nature des phénomènes change.

Il ressort que les orages d'été et les averses d'automne sont les plus à redouter, les cinq premiers mois de l'année présentent des risques bien moindres, juillet également.

CONCLUSIONS

Une des principales difficultés de l'étude de l'érosion est la mesure directe de l'épaisseur de terre perdue par arrachement et entraînement par les eaux ; même lorsque cette épaisseur n'est que de quelques millimètres par an, l'érosion peut être déjà dangereuse.

L'ordre de grandeur des variations de cette épaisseur est faible vis-à-vis des accidents de relief créés par les outils de travail du sol, si bien que l'on manque de points de repère précis.

(1) Cf. note p. 350.

Dans ce travail, nous avons mesuré la profondeur de labour de défoncement pratiqué au début de la plantation, en deux points situés sur une même ligne de plus grande pente et répondant à des critères précis. La différence de profondeur de défoncement rapportée à la distance entre ces deux points représente un indice d'érosion. Il ne permet pas de mesurer l'érosion elle-même mais il traduit l'évolution du profil longitudinal d'une portion de versant soumis à l'érosion.

Parmi les facteurs reconnus prépondérants et notés sur le terrain (pente de la parcelle, taux de cailloux et granulométrie de la couche superficielle du sol, surface du sol couverte par les arbres, hauteur des terrasses, nombre de passages pour l'entretien du sol, âge de la plantation), l'analyse de variance progressive permet d'en retenir trois : la pente, le taux de cailloux, et la hauteur des terrasses. Les deux premiers sont des facteurs reconnus de l'érosion, leur présence dans l'équation linéaire d'évaluation de l'indice et les signes qui affectent leur coefficient permettent d'accréditer l'hypothèse selon laquelle l'expression calculée est un indice de l'érosion.

Pour le troisième facteur, on ne peut conclure.

Cette méthode de mesure simple et rapide, en mettant en évidence les facteurs du milieu qui accentuent ou freinent l'érosion, donne des indications sur l'occupation souhaitable du sol et permet à l'exploitant d'orienter sa décision quant à l'extension possible de sa surface en verger.

Reçu pour publication en avril 1968.

SUMMARY

TENTATIVE INTERPRETATION OF THE RISK OF EROSION IN STEEP ORCHARDS OF THE MIDDLE VIVARAIS

A survey on the potentialities of peach crops in an area of the *departement* of Ardèche, evinced how prominent erosion occurrences were in steep orchards.

To assess the risk of erosion for future plantations, the various factors that promote or lessen carrying away of the soil in existing orchards have been thoroughly investigated. This work consisted in finding the relationships between the features of a number of planted plots, e.g., the slope, features of the soil, age of the trees, tillage, and an erosion index. The latter was worked out from the difference in depth of subsoil ploughing prior to planting, which is measured in an orchard at two specific points meeting definite criteria. To make sure the expression so derived was actually an erosion index, it was ascertained that the relations with the various factors were conformable to those relating these factors with erosion.

A progressive variance analysis evinced the effects of the slope and of the surfaces stoniness.

ZUSAMMENFASSUNG

INTERPRETATIONSVERSUCH DER EROSIONSGEFAHR IN DEN STEIL ANGELEGTEN OBSTGÄRTEN IM MITTLEREN VIVARAIS

Eine Untersuchung über die Erzeugungspotentialitäten des Pfirsiches in einem Gebiet des Departements Ardèche ermöglichte die Feststellung der Wichtigkeit der Erisionserscheinungen in steil angelegten Obstgärten.

Mit dem Ziel, die Erosionsgefahr in den zukünftigen Obstplantagen im voraus zu schätzen, wurde eine Untersuchung der begünstigenden oder begrenzenden Faktoren des Abrutschens der Erde in den vorhandenen Obstgärten unternommen. Es handelte sich, die Beziehungen zwischen den Eigenschaften einer Serie bepflanzter Parzellen, wie z. B. : die Steilheit, die physikalischen Beschaff. heiten des Bodens, das Alter der Bäume, die Bearbeitung des Bodens und einen Erosions-index, zu suchen. Dieser letztere wurde aus den Tiefenunterschied des vor der Pflanzung durchgeführten Tiefpflügens aufgestellt, wobei diese Tiefe in zwei mit genauen Kriterien übereinstimmenden Punkten eines Obstgartens gemessen wurde. Um sich zu vergewissern, dass es sich tatsächlich um einem Index der Erosion handelt, wurde geprüft, ob die Beziehungen zu den verschiedenen Faktoren mit denjenigen, die dieselben Faktoren mit der Erosion verbindet, übereinstimmen.

Die progressive Analyse der Streuung erlaubtees den Einfluss der Steilheit und des Gehaltes der Oberfläche an Kieseln aufzuzeigen.

РЕЗЮМЕ

Опыт интерпретации опасности выветривания в садах расположенных ро крутым склонам в среднем Виварэ.

Ж. П. ДЭФФОНТЭН, Ф. ДЕ МОНТАР.

Анкета о потенциональностях продукции персика, проведенная авторами в одном из районов департамента Ардэш, позволила отметить важность явления выветривания в садах расположенных по склонам.

Чтобы иметь возможность оценить опасность выветривания в будущих посадках, было предпринято изучение факторов благоприятствующих передвижению почвы в существующих уже садах или ограничивающих его. Изучение это состояло в поисках связей между характерными чертами серии засаженных делянок : склон, физические условия почвы, возраст деревьев, обработка почвы и индекс выветривания. Этот последний был определен исходя от разницы глубин вспашки предшествовавшей посадке, измеренных в двух пунктах сада отвечавших определенным требованиям. Чтобы убедиться что найденная величина действительно является индексом выветривания, авторы проверили что ее соотношение с различными факторами совпадало с соотношением связывающим те-же факторы с выветриванием.

Прогрессивный анализ изменчивости позволил выявить влияние склона и процентного количества камней на поверхности.

FIG. 3. — *Parcelle en pente (30%), verger de 5 ans*

FIG. 4 — *Déchaussement d'un pêcher*

FIG. 5 — *Déchaussement de pêchers situés dans une dépression*

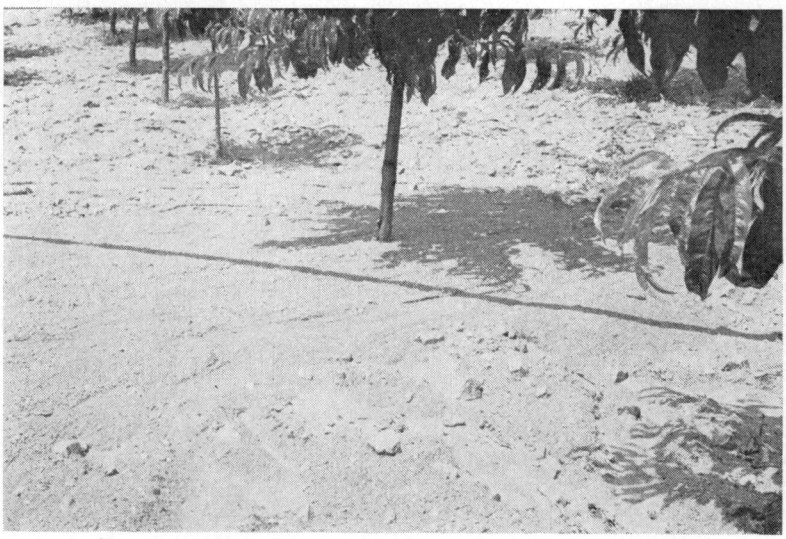


FIG. 6. — *Accumulation de terre en bas de parcelle après un orage*

FIG. 7. — « *Ennoyage* » *d'un pêcher de 10 ans situé au bas d'une parcelle*

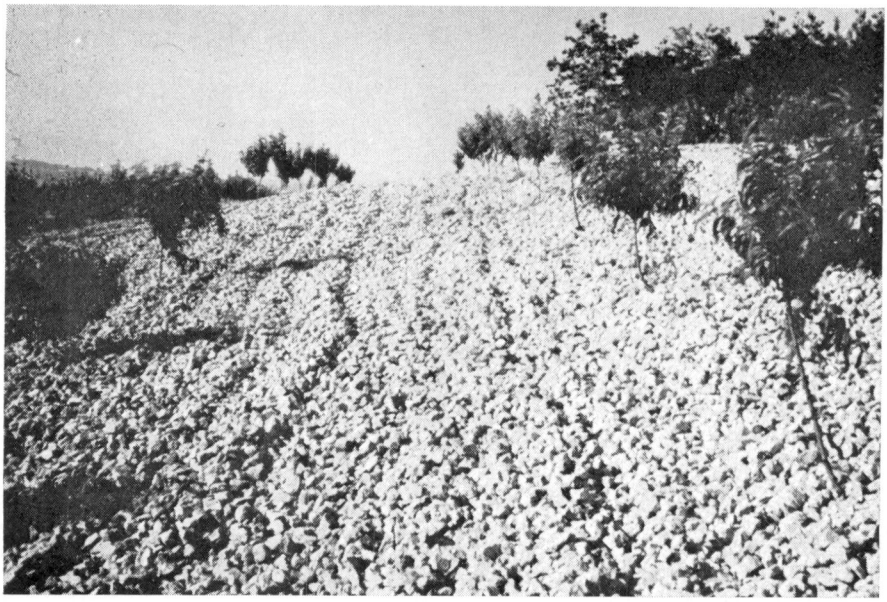


FIG. 8. — *Parcelle en pente très chargée en cailloux*

Ann. agron., 1968, **19** (3), 365-377.

COMPARAISON DES CONSOMMATIONS D'EAU ET DES PRODUCTIONS DE MATIÈRE SÈCHE DE QUELQUES CULTURES IRRIGUÉES

J. PUECH, C. MAERTENS, S. FIORAMONTI, J.-R. MARTY et M. COURAU

avec la collaboration technique de M. CABELGUENNE, M. HERNANDEZ, R. VIARD et A. HILAIRE.

Station d'Agronomie et d'Œnologie, 67, boulevard Deltour, 31 - Toulouse
Institut national de la Recherche agronomique

SOMMAIRE

Les relations entre les évapotranspirations, les stades physiologiques et la production de matière sèche du maïs, du sorgho et de la Fétuque des prés sont comparées. D'autre part, sur un même sol, l'influence des rythmes d'irrigation sur l'ETR et la production du maïs est étudiée.

INTRODUCTION

Parmi les nombreux problèmes que pose l'introduction de l'irrigation en grande culture, les aspects hydrauliques d'une part, économiques et financiers d'autre part, sont généralement l'objet d'une étude attentive, et les réseaux d'irrigation sont souvent conçus en considérant surtout les critères ainsi définis. Sans méconnaître leur importance, nous voudrions ici attirer l'attention sur des aspects d'ordre écologique, qui conditionnent l'efficacité et ainsi la rentabilité de l'irrigation. Ces facteurs concernent notamment l'évolution des besoins en eau de quelques cultures selon leur stade végétatif (ROBELIN, 1962-63), les quantités de matière végétale produites à partir de l'eau consommée, et enfin les conditions d'alimentation hydrique permettant les meilleures productions.

Nous n'avons certes pas la prétention d'apporter à ces questions délicates des

réponses complètes ; nous voudrions seulement mettre en évidence des faits établis au cours d'expérimentations de grande culture, dans des conditions bien définies, de manière à fournir aux agriculteurs irrigants des données précises.

TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES

1. *Évapotranspiration*

Les mesures d'évapotranspirations maximales (ETM) permettent de comparer les consommations des cultures annuelles (maïs et sorgho, par exemple) et celles d'une culture dont l'activité végétative et la couverture du sol se maintiennent pendant toute l'année (prairie). Du point de vue de

TABLEAU I

Doses et dates d'irrigation

Dates d'irrigation	Doses (mm)			
	20 %	40 %	60 %	Période critique
6 juin 1967	16			
14 —	14			
26 —	30	45		
3 juillet 1967	38			
6 —			64	
10 —		45		
11 —	15			
13 —	35			
17 —	35	45		80
24 —	45		75	
25 —		50		
28 —	35			
31 —		50		75
4 août 1967	60	50		
7 —	35		} 90	
8 —				
16 —	34	70		
22 —	50			
24 —			50	
28 —	30			
1er septembre 1967			50	
Totaux				
Nombre d'irrigations	14	7	5	2
Apports d'eau	472	355	329	155

l'irrigation, on peut ainsi préciser, par rapport aux facteurs climatiques, les besoins maxima de la culture considérée au cours des différentes périodes végétatives, notamment lorsqu'elle ne couvre pas entièrement le sol, ou atteint la maturité.

Dans ce but, nous avons comparé, dans quelques secteurs caractérisés par des microclimats et

des sols différents, l'évapotranspiration maximale du maïs, du sorgho et de la Fétuque des prés (variété *Sequana*) ; cette dernière, menée sur évapotranspiromètres, a permis de déterminer l'ETP. Le maïs (variétés *Iowa 4417* et *Funk's G 34*, de précocité comparable) et le sorgho (variété *NK 120*) ont été semés à la même époque et à forte densité. Dans ces essais, le sol a été gardé au voisinage de la capacité au champ, par des arrosages très fréquents, de manière à assurer les besoins maxima en eau. Sur les points éloignés des évapotranspiromètres, la détermination de l'ETP locale a été faite en utilisant les données d'évaporomètres Piche placés sous abris simplifiés (PUECH, 1967). A partir de ces données, nous avons contrôlé, par les mesures d'humidité du sol, que les plantes se trouvaient bien dans des conditions d'ETM. Les bilans hydriques, très nombreux, ont tous été réalisés à partir des mesures faites par l'humidimètre à neutrons (MAERTENS et *al.*, 1965).

2. *Expérimentation d'irrigation*

Une expérimentation, comprenant deux répétitions, portait sur du maïs *Iowa 4417* semé le 26 avril dans un sol de limon profond, dont l'homogénéité est presque exceptionnelle. La fertilisation minérale était assurée très largement.

a) Dans un premier essai, le maïs était semé à 65 000 pieds/ha, en carré, afin d'éviter des écarts d'humidité entre la ligne et l'interligne (COURAU et *al.*, 1966). Les traitements consistaient à combler les réserves en eau du sol à la suite de dessiccations différentes :

A — dessèchement égal à 20 p. 100 de la réserve utilisable (RU) de la tranche de sol effectivement exploitée par les racines, à un stade végétatif donné,
B — dessèchement égal à 40 p. 100 de la RU,
C — dessèchement égal à 60 p. 100 de la RU,
D — irrigation encadrant la « période critique »,
E — témoin sec.

Les dates et les doses d'irrigation sont mentionnées au tableau 1.

b) Dans un deuxième essai, le maïs était planté en ligne à 55 000 pieds/ha, et l'on contrôlait seulement les pluies et les irrigations. Les traitements consistaient à arroser à intervalles de temps variables, avec deux doses différentes, sans toutefois combler les réserves du sol.

Les dates d'irrigations correspondaient à celles du premier essai ; le détail des traitements est indiqué au tableau 4.

RÉSULTATS

1. *Comparaison des évapotranspirations maxima de différentes cultures*

Si, pour des périodes relativement courtes, de l'ordre de la décade, on établit dans le cas du maïs le rapport évapotranspiration maximale/évapotranspiration potentielle de la fétuque, on observe avec les variétés utilisées trois périodes successives (fig. 1) :

— la première période comprend deux phases : dans la première, qui dure environ 40 jours après la levée, « le rapport de consommation » est faible et croît lentement ; puis survient une deuxième phase correspondant au développement rapide du végétal (fin juin et juillet dans ces essais) ;

— la consommation d'eau s'accélère ensuite pour atteindre vers la fin de la floraison mâle, un rapport $\frac{\text{ETM}}{\text{ETP}} = 1$, caractérisant la deuxième période ;

— celle-ci dure environ 50 jours, et le maïs passe enfin à la phase de maturation (3e période), pendant laquelle la consommation baisse progressivement. Les mêmes rythmes de consommation ont été également observés avec le sorgho, arrosé comme

le maïs (fig. 1). Cependant, pour une même variété, et à un même nombre de jours après la levée, peuvent correspondre en deux secteurs très voisins, des rapports $\frac{ETM}{ETP}$ différents, liés notamment à l'influence des propriétés physiques des sols sur la croissance du maïs (fig. 1).

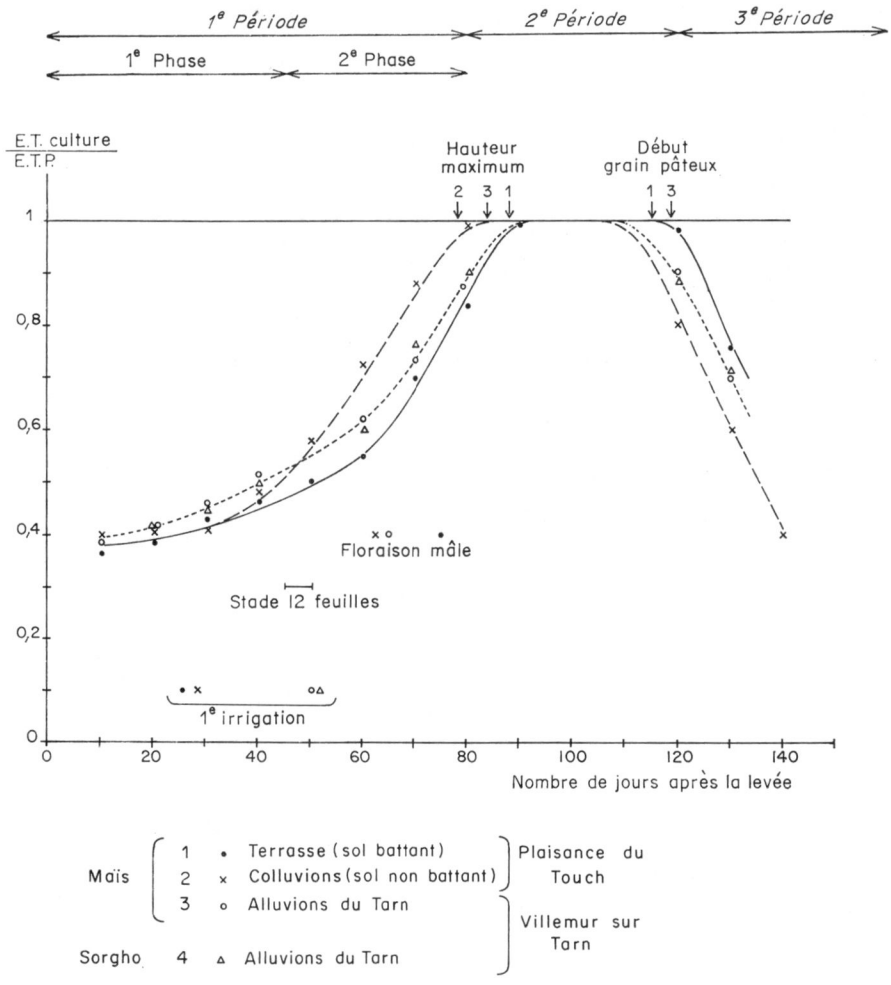


Fig. 1. — *Rapport entre l'évapotranspiration maximale du maïs et du sorgho, et l'ETP.*

2. *Comparaison de la matière sèche produite par les différentes cultures*

Dans les meilleures conditions de fertilisation et alimentation en eau, la comparaison des productions de matière sèche totale entre fétuque, maïs et sorgho,

TABLEAU 2

Production de matière sèche totale pendant une période identique et pour différentes cultures

		Consommation (mm) 10 mai-30 septembre	Production de matière sèche totale (q/ha)	Efficience de l'eau kg MS/mm
Fétuque des prés (var. *Sequana*)		940	134	14,3
Maïs	Terrasse alluviale (Plaisance-du-Touch)	592	187	31,5
	Colluvions (Plaisance-du-Touch)	650	177	27,3
	Vallée du Tarn (Villemur)	520	177	34,0
	Bassin de Revel	599	198,1	33,0
Sorgho	Vallée du Tarn	540	134,5	24,9
	Bassin de Revel	548	132,0	24,1

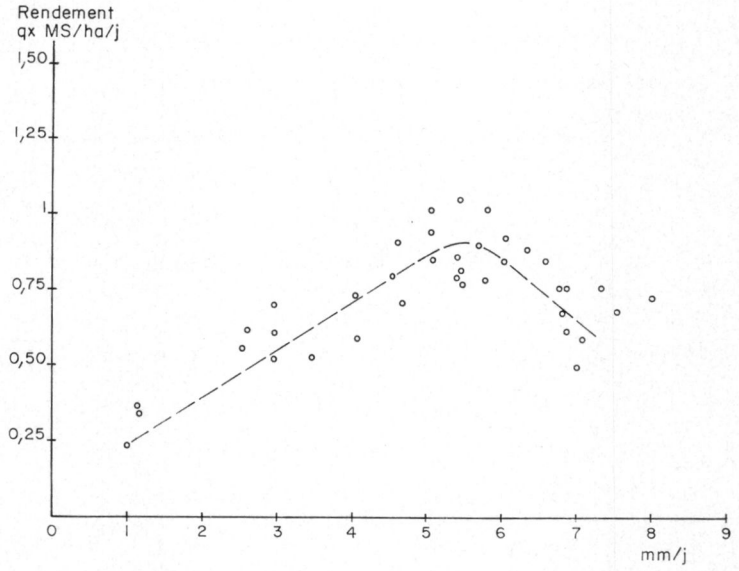


Fig. 2. — *Production de matière sèche d'une culture de Fétuque des prés* (*var.* Sequana) *en fonction de l'ETP journalière* (résultats 1965-1966-1967)

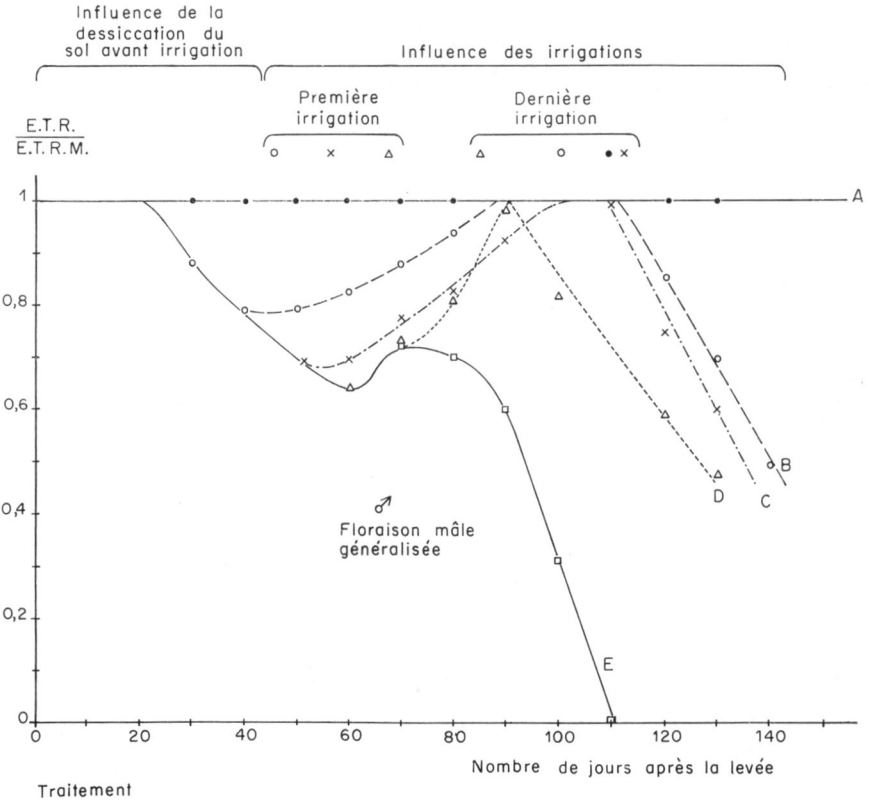


Fig. 3. — *Évolution du rapport* $\frac{ETR}{ETRM}$ *en fonction des différents traitements.*

TABLEAU 3

Résultats du 1er essai

Traitement	Consom. en mm d'eau jusqu'au 30-9	MS totale (qx/ha)	Rendement grain 15 % d'eau (q/ha)	Rapport grain sec / MS totale (en %)	kg de grain par mm d'eau consommée	Participation partielle et moyenne du sol entre les arrosages (mm)
20 %	650	177	107	53	16,5	34
40 %	600	150	94	53	15,6	51
60 %	530	145	86	52	16,2	66
P. C.	450	106	60	50	13,3	95
Sec	353	57	8	12	2,2	

obtenues pendant le même laps de temps (tabl. 2) montre la nette supériorité du maïs ; l'efficience de l'eau est également la plus élevée (kg de matière sèche produite par mm d'eau consommée) pour cette plante. Il ne semble pas que la conduite particulière de la fétuque sur évapotranspiromètre (11 coupes à 10 cm de mai à septembre) soit responsable de la faible efficience de l'eau ; en effet, une autre fétuque un peu moins irriguée, mais n'ayant subi que quatre coupes, fait apparaître une efficience très voisine (15,8 kg MS/mm).

D'autre part, l'intensité de la demande journalière, due à l'ensoleillement intense et à la forte chaleur de juillet, semble avoir joué un rôle important sur la capacité de production de matière sèche de la fétuque (fig. 2). En effet, on note comme DAMAGNEZ (1967), qu'à partir d'une certaine ETP, ici de 5 à 6 mm par jour environ, la production moyenne journalière, observée pendant trois années, atteint un maximum, même lorsque l'eau n'est pas un facteur limitant. On peut toutefois remarquer que la croissance de cette fétuque, bien qu'elle ne soit pas très adaptée aux conditions climatiques, n'a pas été arrêtée au cours de cet été chaud et sec.

3. *Influence de divers rythmes d'irrigation sur l'évapotranspiration et la production de matière sèche du maïs*

Dans les conditions décrites ci-dessus, l'approvisionnement en eau des plantes était assuré de telle sorte qu'elles se trouvaient toujours en régime d'évapotranspiration maximale (ETRM). Ces conditions ne sont toutefois pas facilement réalisables dans la pratique agricole, et nous examinerons maintenant les résultats obtenus avec divers modes de conduite de l'irrigation.

a) *Reconstitution des réserves du sol après des épuisements plus ou moins intenses* (1er essai).

On peut constater, à la figure 3, que les rapports $\frac{\text{ETR}}{\text{ETRM}}$ sont fortement influencés par les possibilités d'alimentation hydrique. Dans un premier temps, avant les irrigations, ce rapport diminue avec la dessiccation du sol, pour ensuite, augmenter lentement après les premiers arrosages. L'influence du retard de végétation sur la consommation, impliqué par le manque d'eau, s'atténue progressivement ; l'ETRM est atteinte, sauf pour le témoin, au cours d'une période d'autant plus courte que la participation des réserves du sol a été plus importante.

La production de grains par rapport à la matière sèche totale est d'environ 50 p. 100 pour tous les traitements irrigués ; la production de grains est bien liée à la croissance végétative du maïs et donc pratiquement proportionnelle à la quantité d'eau consommée. C'est ainsi que les retards pris par certains traitements pendant la phase la plus active de croissance n'ont pas été rattrapés. On peut donc considérer qu'il existe, à ce stade de croissance végétative, une période de sensibilité indépendante de la période critique habituellement considérée (tableau 3).

Cette dernière reste cependant primordiale ; en effet, le manque d'eau pendant cette période a influencé très fortement la production de grains dans le témoin, qui ne représente que 12 p. 100 de la matière sèche totale.

b) *Arrosages plus ou moins abondants et fréquents, sans reconstitution complète des réserves du sol* (2e essai).

Le tableau 4 indique l'ensemble des résultats obtenus. Dans ce type de sol, si les irrigations ne comblent pas entièrement les réserves, le rythme des arrosages devient primordial, principalement pour la production de grains, et cela d'autant

TABLEAU 4

Résultats du 2e essai

Traitement		Irrigation en mm d'eau	Matière sèche totale en q/ha	Rendement grain q/ha (à 15 %)
Nombre d'arrosages	Doses			
14	3/4 traitement A	362	146	99
14	1/2 traitement A	246	130	81,5
7	3/4 traitement B	288	138	84
7	1/2 traitement B	187	120	74,2
5	3/4 traitement C	263	121	69,2
5	1/2 traitement C	170	98	54,2
2	3/4 traitement D	125	83	55
2	1/2 traitement D	80	62	35,4
Sec			57	8

plus que le déficit d'irrigation est important. Comme on peut le constater à la figure 4, les pentes des courbes de production « grains » en fonction des pluies + irrigations, sont plus accentuées pour les traitements 3/4 et 1/2 doses du 2e essai que celles du 1er essai. Ceci indique une influence des rythmes venant s'ajouter à celle des quantités d'eau apportées, malgré une participation du sol plus importante dans certains traitements à doses réduites. On retrouve le même phénomène pour la production de matière sèche totale mais seulement pour les traitements ne comblant que la moitié des réserves.

C'est ainsi que pour des apports d'eau voisins, les différences peuvent être très importantes pour la production de grains, selon le rythme d'arrosage, la paille n'étant pas affectée (tabl. 5). On peut constater l'importance des arrosages au moment de la période critique sur la production en grains ; les différences des doses et des rythmes entre les traitements C 1/2 et D 3/4 n'ont pas eu d'influence sur les rendements en grains, seule la production de matière sèche de la paille a été affectée.

Dans cet essai les rendements paille suivent les doses d'eau alors que les rendements grains sont fonction des rythmes sauf pour le traitement période critique.

Toutefois, l'obtention de rendements élevés nécessite, en l'absence d'autres facteurs limitants, le maintien de la culture dans des conditions voisines de l'évapotranspiration maximale ; cela exclut un dessèchement marqué du sol, et impliquerait donc, en année sèche, des arrosages fréquents, coûteux en matériel et en main-d'œuvre. Quelle que soit la participation que l'on demande au sol, l'irrigation doit être menée rationnellement, en se basant sur la consommation des plantes, et cela

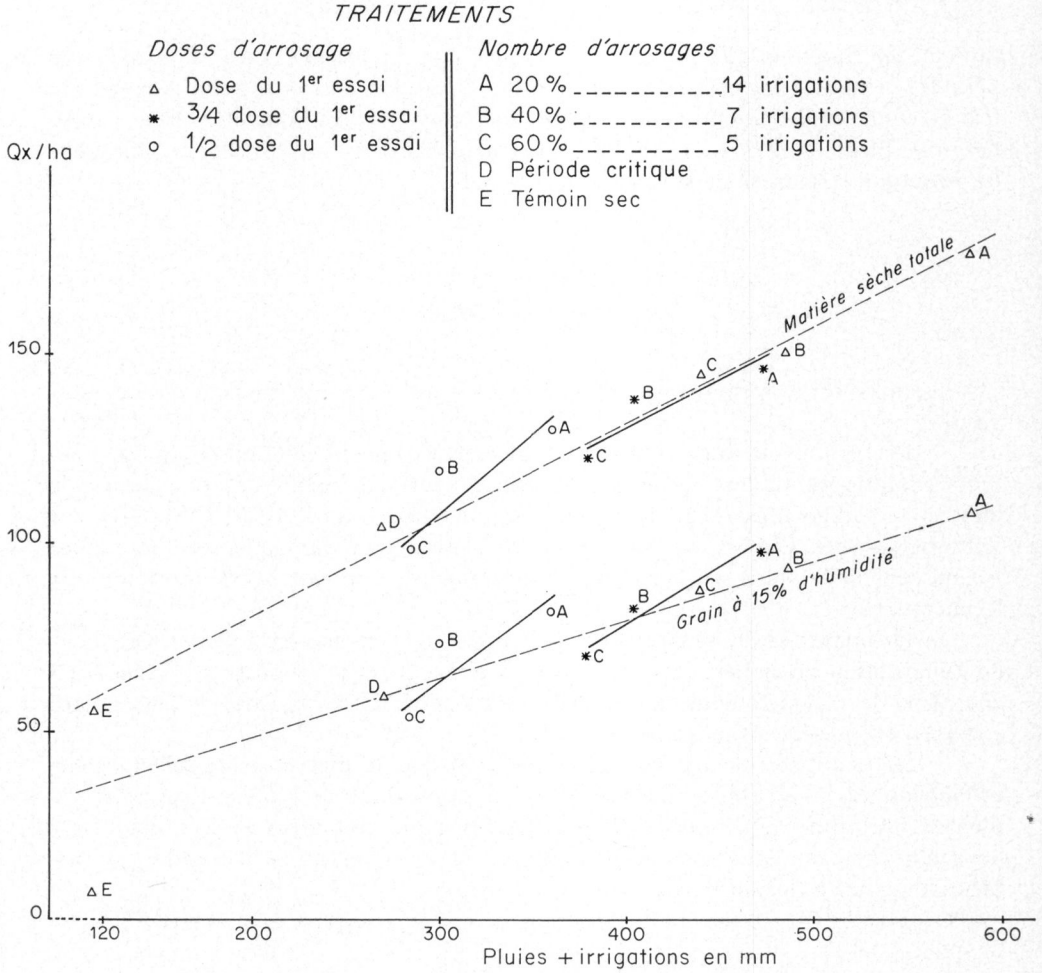


Fig. 4. — *Relation entre la production de grains et de matière sèche, et la pluie + irrigations*

TABLEAU 5

Influence des doses et des rythmes sur la production de grains et de matière sèche

Traitements	Irrigations		Rendement grains (q/ha)	Production Matière sèche	
	mm	nombre		feuilles-tiges (q/ha)	totale (q/ha)
C 3/4	263	5	69,0	52	121
A 1/2	246	14	81,5	49	130
B 1/2	187	7	74,2	46	120
C 1/2	170	5	54,2	44	98
D 3/4 (P. C.)	125	2	55,0	28	83

sans laisser s'accumuler dans le sol un déficit trop important, surtout pendant les périodes critiques. La conduite optimum de l'irrigation doit donc tenir compte à la fois de ces objectifs agronomiques, et des impératifs propres à l'exploitation (nature des sols, disponibilités en capitaux et en main-d'œuvre, ...). Nous nous proposons de revenir ultérieurement sur ces divers points.

CONCLUSIONS

Ces diverses expérimentations permettent ainsi d'aboutir aux conclusions suivantes :

— les besoins en eau des plantes sont essentiellement déterminés par les facteurs climatiques et, lorsque le sol est bien couvert par une végétation active, le maïs et le sorgho présentent des besoins sensiblement égaux à l'ETP mesurée sur Fétuque des prés. Ces besoins maxima peuvent donc être assez facilement déterminés si l'on connaît le stade végétatif, et l'évapotranspiration potentielle caractérisant le microclimat ;

— les quantités de matière sèche produites, et l'efficience de l'eau, dépendent de l'adaptation au milieu des espèces et variétés. Dans les conditions réalisées en 1967 dans la région toulousaine, le maïs s'est mieux comporté que les deux autres cultures, en présence d'irrigation intensive ;

— les quantités de matière sèche produites par le maïs ont été sensiblement proportionnelles aux consommations d'eau, et ont diminué lorsque l'on a fait de plus en plus appel aux réserves du sol. Un optimum technique et économique est donc à rechercher dans chaque exploitation, et nous tenterons d'aborder ce problème dans un prochain travail.

Reçu pour publication en mai 1968.

SUMMARY

COMPARISON BETWEEN THE WATER UPTAKE AND THE DRY MATTER PRODUCTION OF SOME IRRIGATED CROPS

Some ecological aspects which determin the effectiveness and economical value of irrigation have been investigated. The factors concerning the evolution of the water requirements of some crops according to their growth stage as well as the quantitative production of dry matter on the basis of the absorbed water, and lastly the conditions of water supply which entail the highest production have been dealt with.

The maximum evapotranspiration rates (*ETM*) of corn (maize), sorgho and meadow fescue were compared under various environment conditions. The ETP value was settled by means of evapotranspirometers set up under the fescue and by data provided by the Piche evapometer under a simplified screen. In view of creating Max. E. T. conditions, the soil was kept close to the field corrying capacity, and very frequent measurements of the soil moisture were carried out with a neutron moisturemeter. From these, we gather that the water requirements of plants are fundamentally determined by the climatic factors ; consumption however, the rate of water uptake, depends on the physiological stage of the different crops. In the case of corn and sorgho and when the soil is sufficiently overgrown by an active plant cover, the water requirements become approxi-

mately equal to the ETP, calculated on meadow fescue. The max. needs can thus be determined if the physiological stage and the local pot. E. T. are known. On the other hand, the dry matter production and the efficiency of water depend on the adaptation of species and varieties to the environment. In the Toulouse area, in 1967, a year heavy drought, the corn showed a better behaviour than the 2 other crops under conditions of intensive irrigation.

The influence of the irrigation rhythms on evapotranspiration and dry matter production of maize were investigated on one and the same soil ; in a first experiment, we restored the soil reserves after more or less heavy exhaustion and in a 2nd exp. we tried to fill up partly the reserves used.

Under the climatic conditions of that year, the rates of $\frac{\text{Maize ET}}{\text{ETP}} = 1$ have been reached during a period which was all the shorter as the soil reserved had more participated. The dry-matter production is then notably affected.

On the other hand, if a certain water deficit is allowed to accumulate, not completely filling up the reserves, the watering rhythm becomes highly important and the consequences on the crops very marked.

Lastly, the dry matter produced by maize was approximately proportional to the water uptake and it decreased when the soil reserves had to be used.

ZUSAMMENFASSUNG

GEGENÜBERSTELLUNG DES WASSERVERBRAUCHS UND DES ERTRAGS AN TROCKENSUBSTANZ BEI EINIGEN BEWÄSSERTEN KULTUREN

Es werden bestimmte Gesichtspunkte ökologischer Bedeutung, welche die Wirksamkeit und Rentabilität der Bewässerung beeinflussen, untersucht. Die Faktoren, bezüglich der Entwicklung der Wasserbedürfnisse verschiedener Kulturen je nach ihrem vegetativen Zustand sowie der aus dem aufgenommenen Wasser erzeugten Mengen an Trockensubstanz und letzlich der Wasserzuführbedingungen, welche optimale Erträge schaffen, sind analysiert worden.

Die maximalen Evapotranspirationen (ETM) von Maïs, Sorghumhirse und Wiesenschwingel sind unter verschiedenen Umweltsbedingungen verglichen worden. Die potentielle Evapotranspiration (PET) wurde mittels Evapotranspirometern, welche unter Wiesenschwingel aufgesetzt wurden bestimmt sowie anhand des Evaporometers von Piche unter vereinfachtem Schutzdach. Um maximale ET-Bedingungen zu schaffen, wurde der Boden im Bereich der Wasserhaltekapazität im Felde gehalten und sehr häufige Messungen der Bodenfeuchtigkeit mit Hilfe des Neutronenfeuchtigkeitsmessers durchgeführt. Aus diesen Beobachtungen geht hervor, dass die Wasserbedürfnisse der Pflanzen hauptsächlich von klimatischen Verhältnissen abhängig sind ; bei den verschiedenen Kulturen gibt es aber einen Verbrauchsrhythmus, welcher vom physiologischen Entwicklungszustand bestimmt wird.

Bei Maïs und Sorghumhirse entsprechen die Bedürfnisse ungefähr dem *p*ET des Wiesenschwingels, wenn der Boden genügend von einer aktiven Pflanzendecke überzogen ist. Kennt man den physiologischen Zustand und die örtliche *p*ET, so kann man die höchsten Wasserbedürfnisse bestimmen. Andererseits hängen die Mengen an Trockensubstanz und die Wasserwirksamkeit von der Anpassung der Arten und Sorten an die Umwelt ab. 1967, ein sehr trockenes Jahr, verhielt sich der in der Umgebung von Toulouse angebaute Maïs bei intensiver Bewässerung besser als die beiden anderen Pflanzen.

Ausserdem wurde auf ein und demselben Boden der Einfluss der Bewässerungsrhythmen auf Evapotranspiration und Trockensubstanzertrag bei Maïs untersucht. Dazu wurden in einem ersten Versuch die Bodenreserven nach mehr oder weniger intensiver Bodenerschöpfung wiederhergestellt, und in einem zweiten Versuch eine teilweise Nachholung der verbrauchten Reserven gesichert. Unter den Jahresklimabedingungen werden die Verhältnisse $\frac{\text{ET Maïs}}{p\text{ET}} = 1$ erreicht und dies während einer Periode, welche desto kürzer sein wird, als die Beteiligung der Bodenreserven stärker war. Die Trockensubstanzerzeugung wird in diesem Falle weitgehend betroffen.

Wenn man ein gewisses Wasserdefizit durch ungenügendes Ausgleichen der Bodenreserven sich anhäufen lässt, wird der Bewässerungsrhythmus von allererster Bedeutung und die Nachwirkungen auf den Ertrag sehr stark. Letzlich erwiesen sich die Mengen an beim Maïs erzeugten Trockensubstanz annährend proportional zu dem Wasserverbrauch und nahmen ab, wenn die Bodenreserven weiter und weiter angegriffen wurden.

РЕЗЮМЕ

Сравнительное изучение потребления влаги и продукции сухого вещества некоторыми орошаемыми культурами.

Ж. ПЮЭШ, К. МАЕРТЕНС, С. ФИОРАМОНТИ, Ж. Р. МАРТИ и М.КУРО.

Авторы изучили некоторые из аспектов экологического характера, об'уславливающих эффективность и доходность орошения. Рассматривались факторы эволюции водных потребностей некоторых культур, в связи с данной вегетационной фазой, соответствием израсходованной влаги с количеством сформированного сухого вещества, и условиями водного питания необходимыми для увеличения продукции.

Проведены были сравнения максимальных эвапотранспираций (Э.Т.М.) кукурузы, сорго и полевой овсянницы, в различных условиях среды. Потенциальная эвапотранспирация (Э. Т. П.) была получена под овсянницей при помоши эвапотранспирометров, и под упрощенным укрытием с помощью указаний эвапорометра Пиша. Для осуществления условий максимальной эвапотранспирации (Э. Т. М.) почва поддерживалась постоянно в условиях влажности, близких к полевой влагоемкости, и с помощью нейтронного влагомера производились постоянные измерения влажности. Изучение показало, что потребность растений во влаге определяется главным образом факторами климатическими; но для разных культур ритм потребления влаги меняется и зависит он от физиологического состояния растений. Для кукурузы и сорго, при условии достаточного прикрытия почвы растительностью, потребность эта приблизительно равняется величине потенциальной эвапотранспирации под овсянницей. Значит, возможно определить максимальные нужды растений во влаге, принимая во внимание физиологическое их состояние и местную величину Э. Т. П. Сдругой стороны, количество сформированного сухого вещества и эффективность влаги зависят от приспособленности различных видов растений и их сортов, к условиям среды. В районе Тулузы, например, кукуруза лучше приспособилась к интенсивному орошению, чем другие культуры, в засушливом 1967-м году.

На той-же почве авторы изучали также влияние ритмов орошения на эвапотранспирацию и продукцию сухого вещества у кукурузы; было поставлено два опыта :

1. Восстановления почвенных запасов после более или менее сильных почвоутомлений;

2. Частичного заполнения использованных запасов.

В климатических условиях данного года соотношение $\frac{\text{Э. Т. Кукуруза}}{\text{Э. Т. П.}} = 1$ достигалось в течении настолько короткого периода времени, насколько было бóльшим участие почвенных запасов. В этом случае продукция сухого вещества сильно уменьшалась.

С другой сторноы, в случае накопления некоторого водного дефицита и неполного замещения использованных запасов, ритм орошений становится существенным и его после-действие на урожайность — черезвычайно сильным. И, наконец, количество произведенного кукурузой сухого вещества были почти-что пропорционально количеству потребленной влаги и уменьшалось в случаях, когда все чаще прибегалось к использованию почвенных запасов.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

COURAU M., PUECH J., FIORAMONTI S., MAERTENS C., 1966. Observations sur la consommation de l'eau et la production du maïs en culture sèche et irriguée. *Bull. A.F.E.S.*, **2**, 44-59.

DAMAGNEZ J., 1967. Quelques aspects de la production de matière sèche des cultures irriguées, en zone méditerranéenne aride A.I.E.A. *Symposium on the use of radio-isotopes and radiation technics in soil physics and irrigation studies*. Istanbul, 12-16 juin 1967, en cours d'impression.

MAERTENS C., MORIZET J., STUDER R., 1965. Modalités d'utilisation en agronomie d'un humidimètre à ralentissement de neutrons. *Ann. agron.*, **16**, 5-23.

MAERTENS C., FIORAMONTI S., COURAU M., PUECH J., 1966. Modalités d'utilisation de l'eau du sol par le maïs. Examen de la notion de réserve utilisable. *C. R. Acad. Agric.*, **52**, 1338-1348.

PUECH J., 1967. Estimation de l'ETP dans des microclimats provoqués par diverses expositions au vent. *C. R. Acad. Agric.*, **53**, 134-141.

ROBELIN M., 1962. Évapotranspiration réelle de différents couverts végétaux bien alimentés en eau et évapotranspiration potentielle. Détermination expérimentale. *Ann. agron.*, **13**, 493-522.

ROBELIN M., 1963. Contribution à l'étude du comportement du maïs-grain vis-à-vis de la sécheresse. *Journ. internation. irrigation A.G.P.M.* Pau, 69-76.

Ann. agron., 1968, **19** (3), 379-396.

ÉTUDE DES VARIATIONS DE LA COMPOSITION PROTIDIQUE ET GLUCIDIQUE DES PARTIES AÉRIENNES DU DACTYLE (INFLUENCE DES FERTILISATIONS AZOTÉES)

DEUXIÈME PARTIE

J.-M. LEFEBVRE, Élisabeth JOLIET

Station d'Agronomie,
Centre de Recherches agronomiques du Centre-Est, 21 - Dijon
Institut national de la Recherche agronomique

SOMMAIRE

Ce deuxième mémoire rapporte les actions exercées par l'apport d'engrais azotés à doses et à formes variables sur les teneurs en azote total, protéique, amidé, aminé, nitrique, sur les quantités en glucides solubles totaux, glucides réducteurs et saccharose du Dactyle *Floreal* cultivé en plein champ.

INTRODUCTION

Dans un premier mémoire (LEFEBVRE et JOLIET, 1967), nous avons mis en évidence les variations des bilans protidiques et glucidiques chez le Dactyle *Floreal* cultivé en plein champ et recevant une fertilisation azotée faible. Les résultats obtenus précédemment nous ont permis, malgré les fluctuations climatiques des deux années successives d'études, de préciser, en nous appuyant sur le sens des variations de certains composés azotés et glucidiques, deux phases différentes dans la végétation de la plante : d'une part, une phase de printemps ou de reproduction, caractérisée par la montée de l'épi, d'autre part une phase d'été et d'automne végétative, constituée par la succession de série de cycles pendant lesquels la croissance foliaire est continue, la longueur de chaque cycle étant fonction de l'intervention de l'homme car sa durée est réglée par l'ablation des parties aériennes.

MÉTHODES ET TECHNIQUES

Matériel expérimental

Le matériel expérimental choisi est le même que celui décrit dans la première partie de ce mémoire : *Dactylis glomerata* L. variété *Floreal* cultivé en sol brun argileux suivant un dispositif en blocs de Fischer (8 traitements, 6 répétitions) installé au domaine expérimental de l'I. N. R. A., à Bretenières, près de Dijon.

La fertilisation phospho-potassique apportée est la suivante :

100 unités P_2O_5/ha/an
200 unités K_2O/ha/an en deux fois

Les variations de traitement azoté portent sur la comparaison de l'action de doses différentes d'azote nitrique apportées aux plantes, de formes différentes à dose égale d'azote de façon à permettre la comparaison de l'action de l'azote nitrique, de l'azote ammoniacal et du mélange ammoniaco-nitrique sur le métabolisme des plantes et de rythmes d'apport variant suivant les différents cycles végétatifs avec de l'azote nitrique.

Les traitements azotés appliqués sont les suivants : en kg N/ha

	1er cycle	2e cycle	3e cycle	4e cycle	Forme	Date apport
Traitement 1....	50	25	25	30	$(NO_3)_2Ca$	Coupe
Traitement 3....	120	60	60	30	id.	—
Traitement 4....	120	60	60	30	NO_3NH_4	—
Traitement 5....	120	60	60	30	$SO_4(NH_4)_2$	—
Traitement 6....	120	120	0	0	$(NO_3)_2Ca$	—
Traitement 8....	120	60	60	30	id.	15 j apr. coupe

Mode de prélèvement et traitement des échantillons

Les prélèvements ont été effectués en 1963 et 1964 ; la première année étant normalement humide pour la région (658 mm/an) et la deuxième particulièrement sèche (402 mm/an). Il y a eu 4 cycles végétatifs la première année et seulement deux en 1964 avec un arrêt total de végétation en juillet-août.

Le mode de prélèvement est le même que celui décrit précédemment ainsi que le traitement des échantillons (LEFEBVRE et JOLIET, 1967) : prélèvement chaque semaine d'un échantillon moyen des parties aériennes dans chacune des parcelles du dispositif expérimental. Fixation immédiate d'un échantillon par séchage rapide sous vide à basse température (45°C).

Techniques d'analyses

L'extraction des composés azotés et glucidiques solubles est effectuée sur une prise d'essai par l'alcool à 50°GL. à 80°C par extractions successives avec un grand volume de liquide.

Sur des parties aliquotes de cet extrait les dosages suivants sont effectués (voir 1er mémoire LEFEBVRE et JOLIET, 1967).

azote soluble total après réduction des nitrates,
azote ammoniacal selon BACH (1932),
azote nitrique selon BACH,
azote amidé total selon VICKERY (1935),
azote amidé instable correspondant à la glutamine,
glucides réducteurs solubles par méthode SOMOGYI (1937-1952) après défécation de l'extrait,
glucides solubles totaux après hydrolyse à HCl à pH 2.
saccharose après action de l'invertase à 37°C et microdosage des glucides réducteurs libérés.

Les plantes servant de matériel végétal pour cette étude ont été étudiées à partir de la deuxième année de leur installation sur le terrain, la première correspondant au semis, à la levée et à l'emprise

de l'espèce avec développement important du système radiculaire. A partir de la deuxième année, les phénomènes observés au cours de la végétation se retrouvent pendant toutes les années suivantes de végétation, ce qui permet leur comparaison même dans des conditions climatiques différentes comme nous le verrons plus loin.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

A. — *Étude des protides*

Variations de l'azote total (fig. 1).

Dans l'examen des résultats obtenus, les variations de l'azote total représentent le bilan des variations de nombreux composés minéraux et organiques. Nous indiquerons brièvement ces résultats, préférant analyser plus en détail ceux obtenus dans l'étude de chacune des fractions azotées.

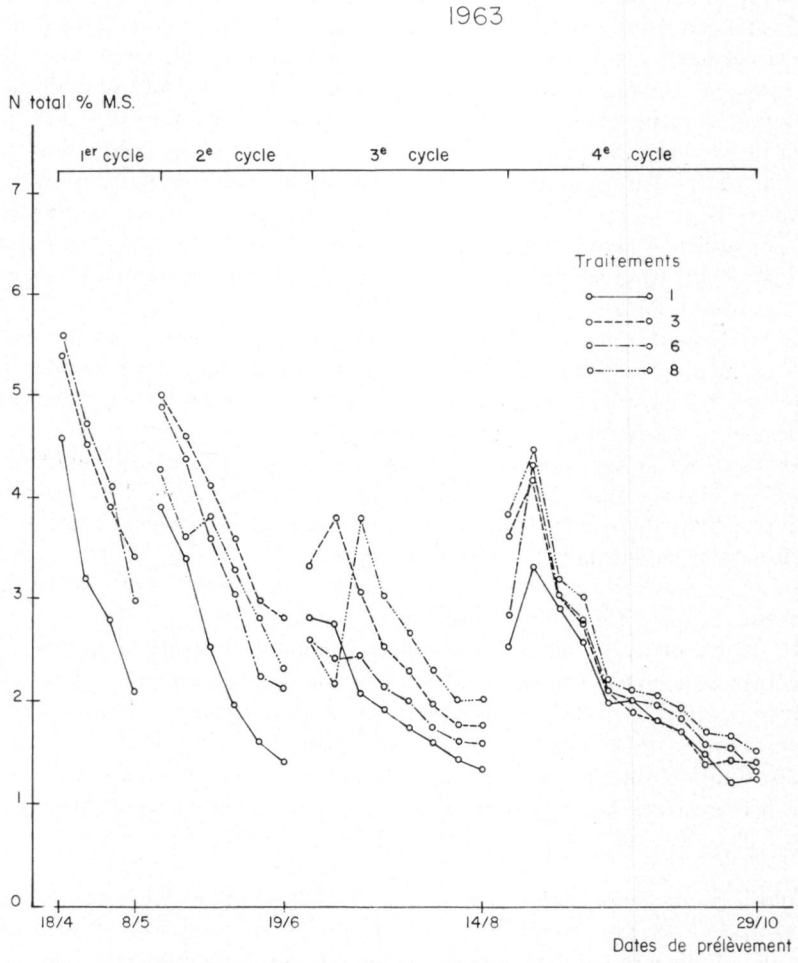


FIG. 1. — *Variations de l'azote total au cours de la période de végétation chez le Dactyle* Floréal *recevant des traitements azotés variables*

Comme nous l'avons déjà fait remarquer dans la première partie de ce mémoire, malgré les grandes différences climatiques des deux années d'étude 1963 et 1964, et quels que soient les traitements azotés appliqués, on observe une très grande similitude dans les variations de l'azote total.

En année humide, au premier cycle végétatif, les valeurs obtenues décroissent régulièrement pour atteindre, suivant les traitements azotés appliqués, entre 2 et 3,5 p. 100 de la matière sèche à la fin du cycle, la coupe se situant suivant les traitements à des stades végétatifs compris entre courant montaison et début épiaison. Cette variation dans l'état végétatif est due à la quantité plus ou moins grande d'azote apportée, les doses fortes favorisant une montaison plus rapide.

Au cours du deuxième cycle en année normalement humide, on observe des variations dans le même sens montrant une similitude parfaite, compte tenu de la quantité d'azote apportée.

Pour une même dose d'azote, quelle que soit la forme, nitrique, ammoniaco-nitrique ou ammoniacale, le phénomène est le même et de même importance.

Il est à noter qu'à partir de cette deuxième période de croissance et jusqu'à la fin de la végétation, si la fertilisation azotée est apportée avec un décalage de quinze jours après la coupe et non à cette coupe comme cela se pratique habituellement, on observe un enrichissement des parties aériennes qui est toujours plus important jusqu'à la fin du cycle que celui observé après l'apport d'une même dose immédiatement après la coupe (comparaison des traitements 3 et 8 de notre essai).

Au cours du 3e cycle végétatif se situant entre la fin du mois de juin et le mois d'août, on assiste d'abord à une augmentation de l'azote total, puis à une diminution lente mais régulière avec un classement des quantités trouvées qui est fonction des doses d'azote apportées.

Le traitement à apport décalé se sépare encore plus nettement des autres traitements à même dose qu'au deuxième cycle, on y remarque une augmentation brutale de l'azote dans les 8 jours suivant l'apport avec ensuite des valeurs toujours plus élevées en azote total jusqu'à la fin du cycle.

Au cours de la dernière période végétative comprise entre fin août et courant octobre, on observe jusqu'à la fin de la végétation une diminution régulière et de plus en plus lente de tous les traitements dont les courbes représentatives se trouvent à peu près confondues dans le courant de septembre.

En année très sèche, on observe au premier cycle les mêmes variations avec une séparation régulière suivant la quantité d'azote apportée.

Au deuxième cycle, on y retrouve le phénomène habituel puis, après un arrêt de végétation, la concentration en N total de tous les traitements se maintient avec régularité jusqu'à la fin de la période végétative autour d'une valeur moyenne située à 2,6 p. 100 d'N total dans la matière sèche.

Les résultats obtenus au cours de cette année recoupent ceux exposés ci-dessus, c'est-à-dire enrichissement important en azote total avec la fertilisation décalée.

Variations de l'azote protéique (fig. 2).

Comme nous l'avons déjà montré lors de notre premier mémoire (LEFEBVRE et JOLIET, 1967), les variations de l'azote protéique présentent certaines analogies avec celles de l'azote total puisqu'elles représentent la partie condensée de l'azote absorbé et transformé en composés organiques.

Le sens des phénomènes est comparable, à la différence près qu'au début des cycles, on assiste à des accumulations transitoires de nitrates d'autant plus élevées que les quantités d'azote apportées sont importantes (fig. 4). L'azote minéral intervenant de façon non négligeable, les variations de l'azote protéique ont donc une amplitude plus faible.

L'influence du décalage de l'apport de nitrate de chaux (traitement 8) est encore plus marquée sur les valeurs trouvées en azote protéique et cet enrichissement rapide se maintient même après une période de sécheresse prolongée.

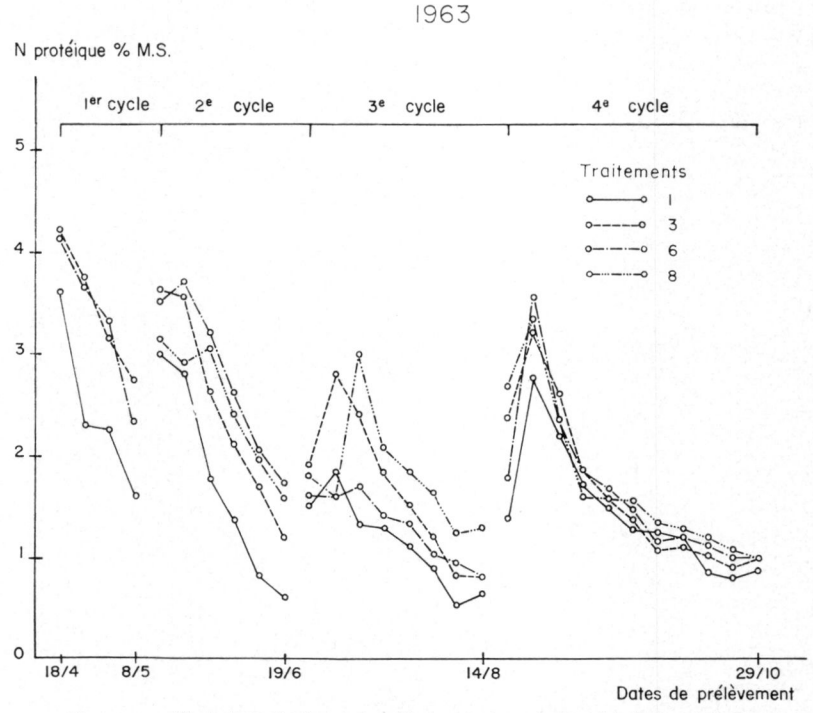


FIG. 2. — *Variations de l'azote protéique au cours de la période de végétation chez le Dactyle* Floréal *recevant des traitements azotés variables*

Dans le cas du traitement 8, la réduction des nitrates est très rapide et presque instantanée, et la métabolisation de l'azote en composés organiques solubles et condensés importante. Les protéines synthétisées sont en quantité plus importante (de l'ordre de 50 p. 100 en plus à la fin du cycle pour une même quantité d'azote apportée au début).

Cette valorisation de l'azote est fondamentale du point de vue nutritionnel car, à la fin de l'année, pour une même quantité de matière sèche produite à l'hectare, l'augmentation des protéines brutes fabriquées est considérable, et de ce fait, il en découle une modification importante de la composition et de la qualité du produit récolté et consommé (LEFEBVRE, 1967).

Il a été constaté fréquemment que dans le cas des organes de réserves tels les grains, en particulier chez le blé et le maïs, si l'on augmente la production de matière

sèche par une fertilisation azotée élevée, la teneur en lysine et en quelques autres acides aminés indispensables à la croissance est diminuée dans l'ensemble de l'azote protéique par une modification importante du rapport des diverses protéines entre elles.

Il est possible d'ailleurs que dans les parties aériennes, le phénomène soit différent.

Nous avons retrouvé comme dans nos premiers résultats (LEFEBVRE et JOLIET, 1967), une corrélation hautement significative entre les teneurs des échantillons en azote total et en azote protéique pour chacune des années étudiées.

Les droites obtenues (fig. 3) correspondent aux valeurs des plantes ayant reçu des doses d'azote différentes, des formes différentes et des rythmes différents :

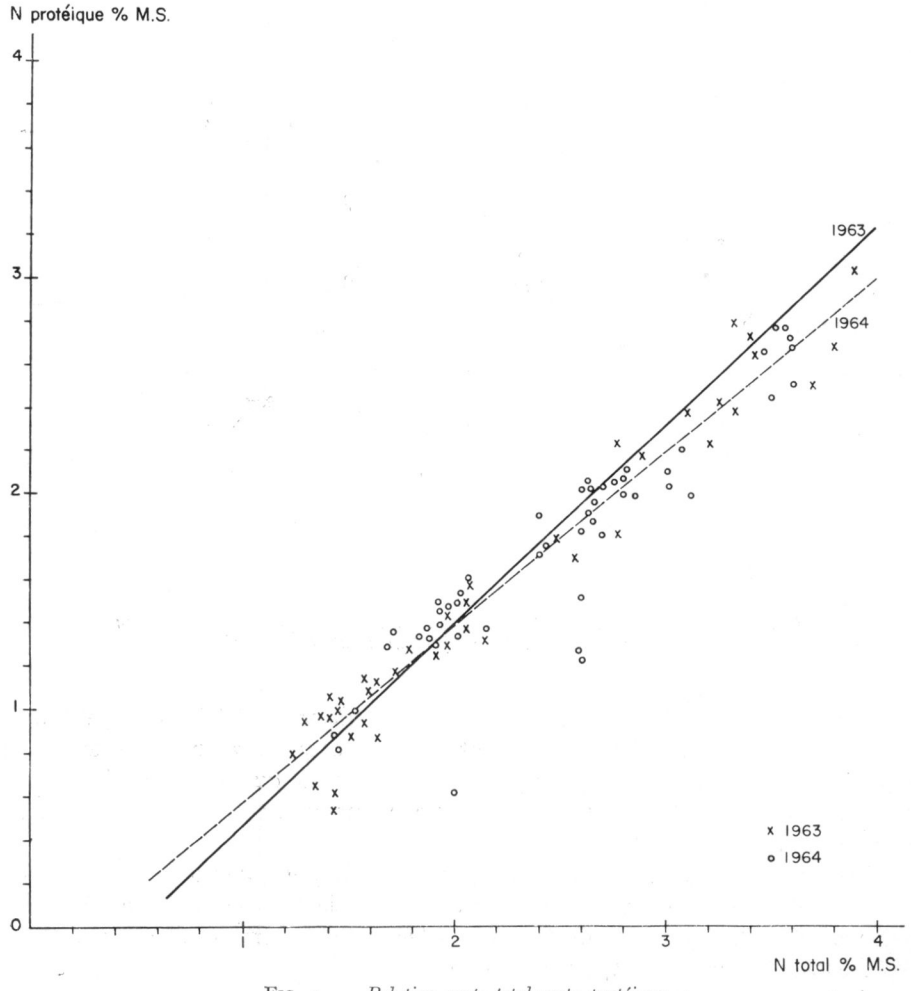


FIG. 3. — *Relation azote total-azote protéique chez le Dactyle* Floréal *pour plusieurs traitements azotés*

1963 $y = 0{,}844\,x - 0{,}380$ y = N protéique
1964 $y = 0{,}809\,x - 0{,}254$ x = N total

Ces droites de régression ont pour formule :

en 1963, $y = 0{,}844\ x - 0{,}380$
très hautement significative à 1 p. 100 ($r = 0{,}98$)
en 1964, $y = 0{,}809\ x - 0{,}254$
très hautement significative à 1 p. 100 ($r = 0{,}94$)

où y représente l'azote protéique et x l'azote total.

Cela met en évidence une très grande stabilité physiologique du matériel végétal étudié malgré des conditions de comparaison aussi dissemblables à première vue que des climats différents, des cycles végétatifs, des doses et des formes d'azote différentes par exemple (fig. 3).

Variations de l'azote organique total et soluble.

L'azote organique total traduit de façon précise l'allure générale et la vitesse des synthèses protidiques ayant lieu dans les parties aériennes du dactyle. Les valeurs obtenues correspondent du début à la fin des synthèses aux amino-acides et aux amides libres, puis aux peptides et aux polypeptides de poids moléculaire de plus en plus élevés, enfin, aux différentes protéines foliaires cytoplasmiques et membranaires. De plus, des mécanismes de protéolyse existant de façon continue dans les organes vivants dont les édifices protéiques sont en perpétuelle réorganisation, les valeurs exprimées en azote organique total représentent donc un bilan entre la synthèse et la dégradation à l'instant du prélèvement.

Dans les cycles de printemps, quel que soit le niveau azoté, on constate que l'azote organique soluble (tabl. 1) constitué essentiellement par des amino-acides et des amides représente le quart ou le cinquième de l'azote organique total, le reste étant constitué par des protéines ; cette accumulation transitoire de formes solubles met en évidence une certaine lenteur dans les phénomènes de synthèse en formes condensées.

Par contre, en été, où la température est plus élevée, la vitesse de ces mécanismes de synthèse est très grande et dès le début du cycle, l'azote métabolisé dans la plante se retrouve très facilement sous forme protéique et les quantités d'amides et d'amino-acides libres sont d'abord élevées puis plus faibles.

Avec des valeurs assez comparables entre les différents traitements, on observe en fin de période végétative, en octobre-novembre, une diminution beaucoup plus lente de l'azote organique soluble que de l'azote protéique. Ceci est dû à une accélération de la protéolyse dans les limbes foliaires âgés et à un ralentissement de la synthèse protéique (MOYSE, 1950).

Dans les résultats que nous avons obtenus, nous avons pu mettre en évidence une métabolisation un peu plus rapide de l'azote en composés organiques solubles tels que les amides et les amino-acides, par apport de la fertilisation sous forme ammoniaco-nitrique ou ammoniacale, à dose égale d'azote, comparée à la forme nitrique.

Variations des amides et des amino-acides libres (tabl. 1).

En effet, après l'apport d'azote, on observe un enrichissement assez rapide des parties foliaires en amides, glutamine et asparagine, et amino-acides ; cet enrichissement élevé et temporaire dans le cas des apports nitriques est par contre beaucoup plus important et se maintient plus longtemps pendant le cycle végétatif, dans le cas de la forme ammoniaco-nitrique et surtout de la forme ammoniacale. Dans ce cas,

TABLEAU I

Teneur en N des amides et des amino-acides libres du Dactyle (année 1963)
(Résultats d'analyses exprimés en p. 100 de Matière sèche)

	1er cycle				2e cycle						3e cycle			
	18-4	25-4	2-5	8-5	16-5	22-5	31-5	6-6	13-6	19-6	27-6	4-7	11-7	18-7
Traitement 3														
N-glutamine	0,10	0,06	0,07	0,05	0,04	0,07	0,03	0	0,05	0	0,12	0,12	0	0,01
N-asparagine	0,09	0,03	0	0,05	0,07	0,08	0,01	0,05	0	0,13	0,06	0,01	0,06	0,03
N-amino-acides	0,56	0,56	0,46	0,28	0,60	0,50	0,68	0,56	0,37	0,70	0,71	0,63	0,45	0,53
N-organique soluble	0,76	0,65	0,53	0,38	0,71	0,65	0,72	0,61	0,42	0,83	0,89	0,75	0,51	0,57
Traitement 8							apport N						apport N	
N-glutamine					0	0,02	0,02	0,02	0	0,05	0,11	0,02	0	0,02
N-asparagine					0,10	0,05	0,06	0	0	0	0,03	0,03	0,05	0,03
N-amino-acides					0,59	0,52	0,26	0,68	0,66	0,56	0,46	0,38	0,62	0,75
N-organique soluble					0,69	0,59	0,34	0,70	0,66	0,61	0,60	0,43	0,67	0,80

	3e cycle				4e cycle									
	24-7	1-8	8-8	14-8	21-8	28-8	4-9	11-9	18-9	25-9	2-10	9-10	16-10	23-10	29-10
Traitement 3															
N-glutamine	0	0,04	0,06	0,05	0,18	0,05	0	0,08	0,01	0,04	0	0,05	0,03	0,03	0,02
N-asparagine	0,03	0,03	0,04	0,04	0,10	0,08	0,06	0,14	0,04	0,03	0,05	0	0,05	0,04	0,01
N-amino-acides	0,61	0,60	0,82	0,73	0,33	0,51	0,57	0,71	0,41	0,56	0,44	0,43	0,41	0,27	0,24
N-organique soluble	0,64	0,67	0,92	0,82	0,61	0,64	0,63	0,93	0,46	0,63	0,49	0,48	0,49	0,34	0,27
Traitement 8						apport N									
N-glutamine	0,04	0,06	0,03	0,06	0,15	0,04	0,06	0,15	0,05	0,03	0,05	0,04	0,04	0,09	0,04
N-asparagine	0	0,01	0,02	0,02	0,10	0,15	0,07	0,13	0,04	0,02	0,01	0,05	0,02	0,02	0,05
N-amino-acides	0,58	0,59	0,68	0,54	0,43	0,53	0,45	0,80	0,47	0,40	0,44	0,38	0,39	0,25	0,45
N-organique soluble	0,62	0,76	0,73	0,62	0,68	0,72	0,68	1,08	0,56	0,45	0,50	0,47	0,45	0,36	0,54

les valeurs les plus élevées correspondent à la glutamine et restent plus faibles pour l'asparagine.

Au sujet des amino-acides libres, pour une même quantité d'azote apportée aux plantes, il est à noter que les valeurs trouvées sont très rapidement élevées (une semaine) dans le cas d'un apport nitrique et plus faible dans le cas des formes NO_3NH_4 et NH_4. Ensuite au cours de la période végétative étudiée, dans le cas d'un apport nitrique, les valeurs en amino-acides libres diminuent rapidement et augmentent de nouveau irrégulièrement, alors que dans le cas des formes contenant de l'ammonium, on observe une augmentation lente, mais régulière dans le temps puis une diminution très lente, les valeurs trouvées à la fin du cycle étant toujours plus élevées pour les formes ammoniacales.

Variations de l'azote minéral (fig. 4).

L'azote minéral représente la somme des valeurs des nitrates et de l'ammoniaque libre existant réellement dans les extraits, la méthode de dosage utilisée n'altérant pas les corps très labiles comme les amides et en particulier la glutamine.

Comme nous l'avons déjà fait remarquer (Lefebvre et Joliet, 1967), l'ammoniaque libre est toujours en quantité très faible et de ce fait, les variations observées correspondent essentiellement aux nitrates.

Si l'on examine les différents traitements, les nitrates présentent des courbes de variations très intéressantes.

Au début des cycles végétatifs, les valeurs trouvées dans les parties aériennes sont d'autant plus élevées que les apports sous forme nitrique ont été plus importants, mais, par contre, à quantité d'azote égale, on observe un maximum en début de cycle, beaucoup plus faible pour les formes ammoniaco-nitriques et les formes ammoniacales que pour les formes nitriques.

En 1963, c'est-à-dire en année de végétation normale, les valeurs obtenues au début du deuxième cycle sont très élevées et atteignent plus de 0,7 p. 100 de N NO_3 dans la matière sèche et 0,5 p. 100 au début des troisième et quatrième cycles.

Plus on avance en végétation vers l'été, c'est-à-dire vers la période de température moyenne élevée plus la décroissance est rapide. Alors qu'au printemps, la valeur la plus faible pour la dose d'azote la plus élevée se situe autour de 0,25 p. 100 N NO_3 dans la matière sèche, en été et en automne la valeur moyenne est toujours en dessous de 0,1 p. 100 avec des variations de faible amplitude jusqu'à la fin de chaque cycle.

Si la fertilisation azotée n'est pas apportée après la coupe comme il est d'usage dans la pratique agricole, mais après quinze jours de repousse (traitement 8 de l'essai étudié), on observe un fait intéressant : pour une même quantité d'azote nitrique apportée, les valeurs de nitrates libres trouvées suivent une courbe de variation très différente de celles des autres traitements. On a une très légère augmentation après l'apport puis une diminution beaucoup plus importante.

A titre comparatif, si l'on apporte 60 kg de N/ha sous forme nitrique aux deuxième et troisième cycles végétatifs, on atteint 0,65 p. 100 de N NO_3 p. 100 de la matière sèche pour un apport normal et 0,14 p. 100 dans le cas d'un apport décalé avec des teneurs beaucoup plus faibles dans ce cas à la fin des cycles considérés. Ce fait est très important car si l'herbe est consommée jeune par des animaux, il peut s'en suivre des phénomènes de toxicité avec possibilité de mort du bétail.

Le fait d'apporter l'azote nitrique sur le dactyle à un moment où la plante a déjà reconstitué un appareil végétatif fonctionnel, permet une réduction des nitrates aborbés par le système radiculaire beaucoup plus rapide avec pour conséquence une meilleure métabolisation de l'azote en composés organiques solubles. Il est à remarquer, à la vue des figures présentées, qu'il est fort probable que les teneurs en

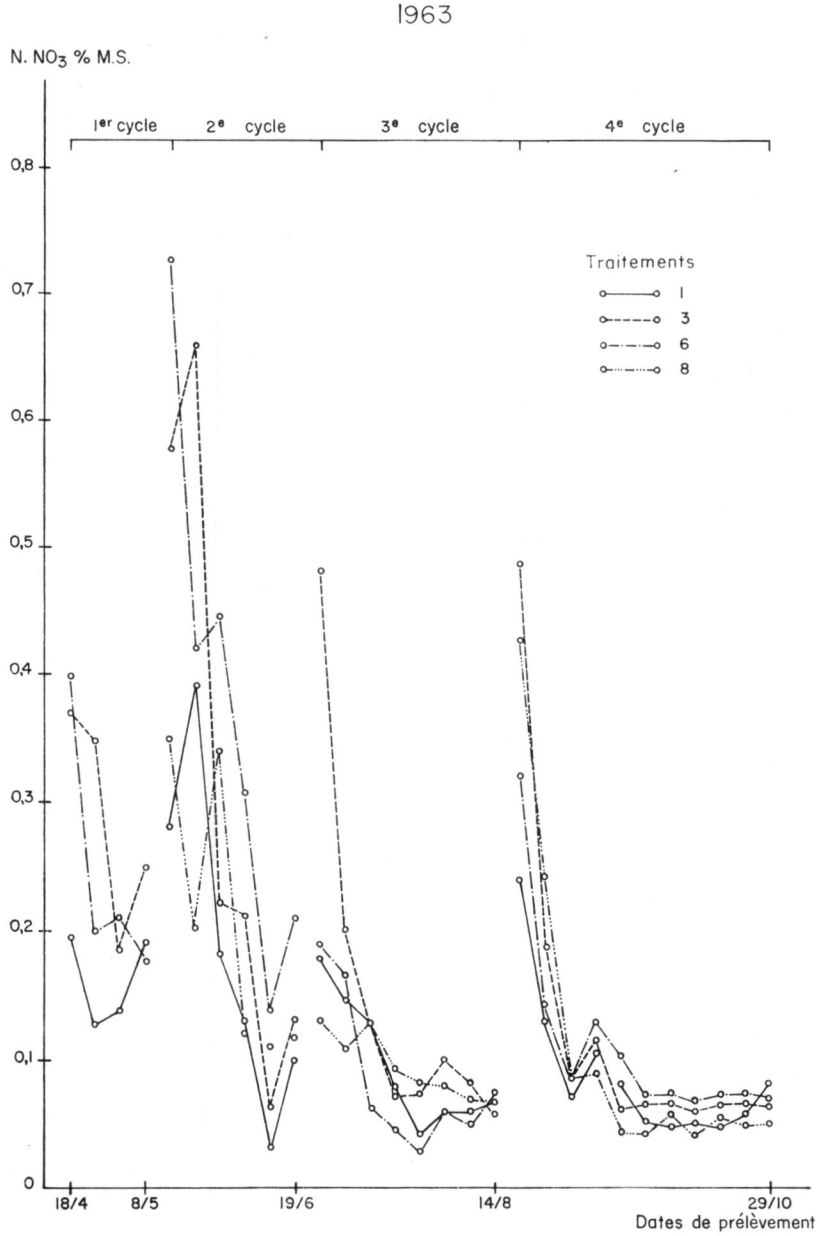


FIG. 4. — *Variations de l'azote nitrique au cours de la période de végétation chez le Dactyle* Floréal *recevant des traitements azotés variables*

nitrates des parties aériennes au début du premier cycle sont beaucoup plus élevées que celles qui correspondent à nos premières mesures.

En effet, nous ne prélevons nos échantillons de parties aériennes que lorsqu'elles commencent une croissance visible après la période de repos végétatif d'hiver.

En 1963, compte tenu de la taille des plantes, les prélèvements ont débuté dans le courant du mois d'avril, l'apport de la fertilisation ayant lieu à la mi-février ; il est normal que les teneurs en nitrates aient déjà diminué malgré une température moyenne faible.

En 1964, ces prélèvements ont été effectués beaucoup plus tôt.

Au cours du premier cycle, il est à noter que dans le cas d'un apport d'azote sous forme ammoniacale, les valeurs de nitrates trouvées au début du cycle sont plus élevées que pour la même dose sous forme nitrique. Cela est normal à cause du retard dû à la nitrification lente à basse température de l'ammoniaque présent dans le sol et ce qui a pour conséquence une absorption plus tardive des nitrates dans ce traitement.

B. — *Étude des glucides*

Ce travail ayant pour objet la détermination des variations du métabolisme au cours de la croissance, nous nous sommes intéressés plus spécialement aux glucides solubles : glucides solubles totaux, glucides réducteurs solubles et saccharose seul.

Variations des glucides solubles totaux (fig. 5).

Si l'on examine les résultats obtenus au cours du premier cycle de printemps durant les deux années étudiées, on obtient des valeurs très élevées qui sont d'autant plus fortes que la quantité d'azote apportée est plus faible. Ces valeurs sont comprises entre 5 et 11 p. 100 de la matière sèche et 7 à 15 p. 100 en 1964.

Pour une même dose d'azote apportée (120 kg N/ha), on n'observe pas de différence entre les formes au cours des deux années dans les teneurs en glucides solubles totaux. Dans le cas du deuxième cycle en 1963 et 1964, on observe d'abord une augmentation rapide dans les 15 jours suivant la coupe, puis une diminution faible et de nouveau une augmentation rapide allant jusqu'à l'arrêt de végétation en 1964 et par contre suivie d'une nouvelle diminution en 1963.

Aux troisième et quatrième cycles, on observe une augmentation assez régulière au bout de 15 jours à 3 semaines de repousse jusqu'à la fin des cycles pour attendre en fin de végétation des valeurs de 12 à 14 p. 100 de glucides solubles totaux dans la matière sèche.

Il convient de noter un certain décalage dans les teneurs en fonction des apports azotés (valeurs fortes pour faibles quantités d'azote et réciproquement). Dans le cas de l'apport décalé (traitement 8) où les valeurs en azote total sont toujours plus élevées, les teneurs en glucides solubles se situent au même niveau que celles des traitements plus faibles en azote.

En 1964, malgré l'arrêt de végétation dû à la sécheresse, les teneurs en glucides solubles totaux trouvées après la repousse des parties aériennes au cours du mois de septembre sont du même ordre que celles trouvées à l'arrêt de végétation en juillet et croissent ensuite régulièrement jusqu'à la fin du mois d'octobre, puis, contraire-

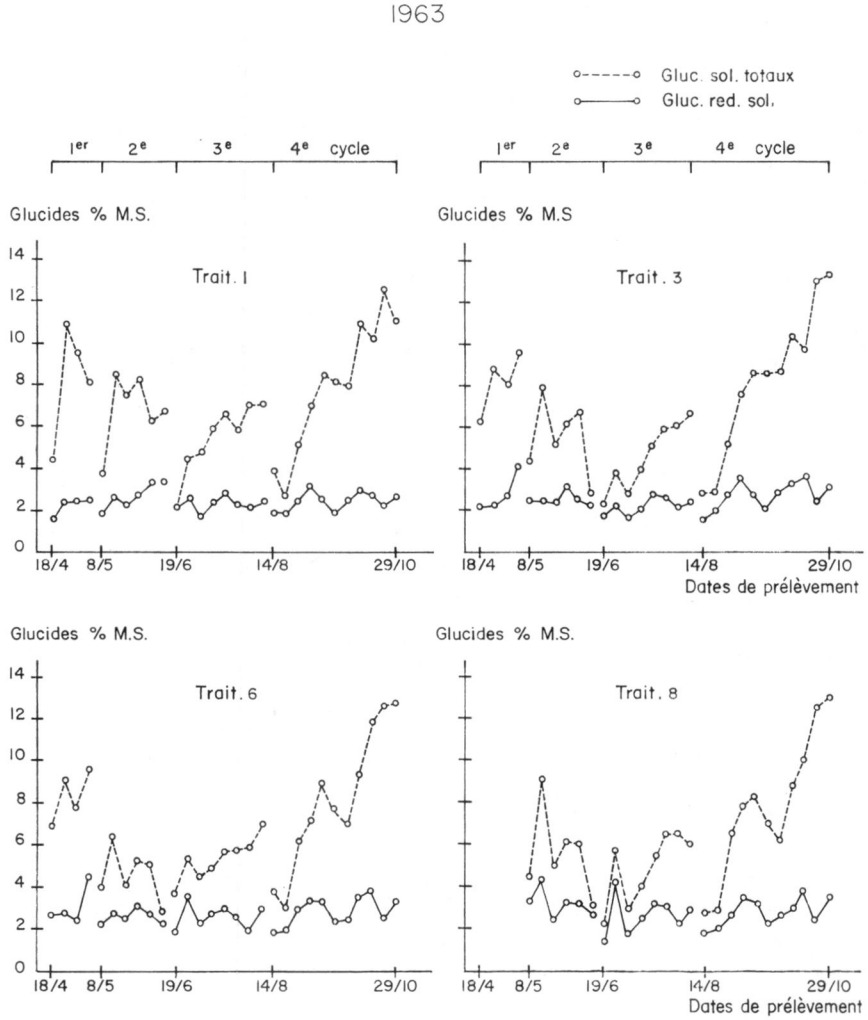


FIG. 5. — *Variations des glucides solubles au cours de la période de végétation chez le Dactyle* Floréal *recevant des traitements azotés différents*

ment à ce que l'on observe en 1963, diminuent sensiblement jusqu'à l'arrêt de végétation. Dans ce cas, le phénomène est toujours de même sens : quantités de glucides faibles pour quantités d'azote élevées et réciproquement.

Variations des glucides réducteurs solubles (fig. 5).

L'examen des variations des glucides réducteurs solubles met en évidence pour tous les traitements azotés une similitude totale de ces variations, quels que soient les traitements azotés appliqués aux plantes, avec des différences peu importantes, suivant que l'on s'adresse à de faibles ou à de fortes doses d'azote.

Par contre, on observe des variations très rapides couvrant un laps de temps très court et présentant alternativement des périodes de synthèses et de disparition par combinaison dans des molécules plus importantes, disaccharides ou plus condensés.

L'amplitude de ces variations est plus longue aux cycles de printemps et plus courte aux cycles d'été et d'automne.

Au début de chaque cycle, on observe d'abord une augmentation importante ; les valeurs trouvées sont comme nous l'avons souligné précédemment, en relation inverse avec la teneur en azote des parties aériennes. Si l'on prend un exemple chiffré dans un cas où cette variation est la plus importante, au début du troisième cycle de l'année 1963, on note une teneur de 4,2 p. 100 de la matière sèche en glucides réducteurs pour le traitement 8, le plus faible en azote au moment où l'apport de la fertilisation n'a pas encore été effectué, et de 2,30 p. 100 pour le traitement 3 où l'azote a été apporté sous forme nitrique à la même dose après la coupe.

Il est à noter que dans ce cas, le fait d'apporter la fertilisation sous forme ammoniaco-nitrique et ammoniacale permet une augmentation importante des glucides réducteurs solubles, l'azote apporté ayant été moins métabolisé chez des plantes venant de subir une coupe des parties aériennes.

Variations du saccharose (fig. 6).

Les variations du saccharose sont d'une amplitude très importante. On y observe des alternances très rapides de synthèse et de dégradation, cette diminution étant due à sa transformation très rapide en glucofructosanes plus condensés. Au premier cycle végétatif, pour un même traitement azoté, on voit le pourcentage de saccharose par rapport à la matière sèche passer en une semaine de 2 à 8 p. 100 puis redi[illegible]nuer aussi rapidement la semaine suivante.

Après l'arrêt de végétation de 1964, les teneurs en saccharose restent tout à fait constantes pour tous les traitements par rapport aux valeurs trouvées avant l'arrêt de végétation, l'intensité des variations s'amplifiant au fur et à mesure que l'on se rapproche de la fin de la période végétative.

Au mois de novembre, entre deux prélèvements voisins, les variations des teneurs en saccharose à une même date de prélèvement sont peu importantes entre les différents traitements azotés.

Variations du rapport : glucides solubles/matières azotées (fig. 7).

Ce rapport dont nous avons examiné les variations dans notre premier mémoire pour un traitement azoté faible, présente de très grandes analogies entre les différents traitements azotés et en aucun cas, nous n'avons retrouvé les valeurs données dans la

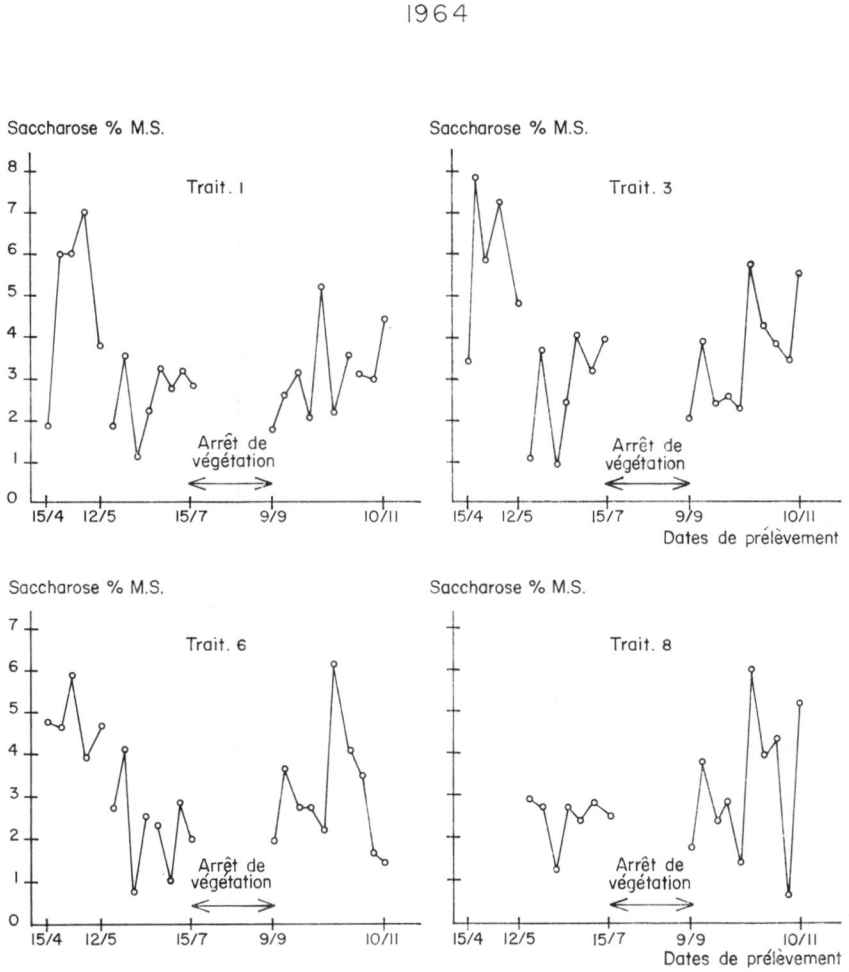


FIG. 6. — *Variations du saccharose au cours de la période de végétation chez le Dactyle* Floréal *recevant des traitements azotés différents* (1964)

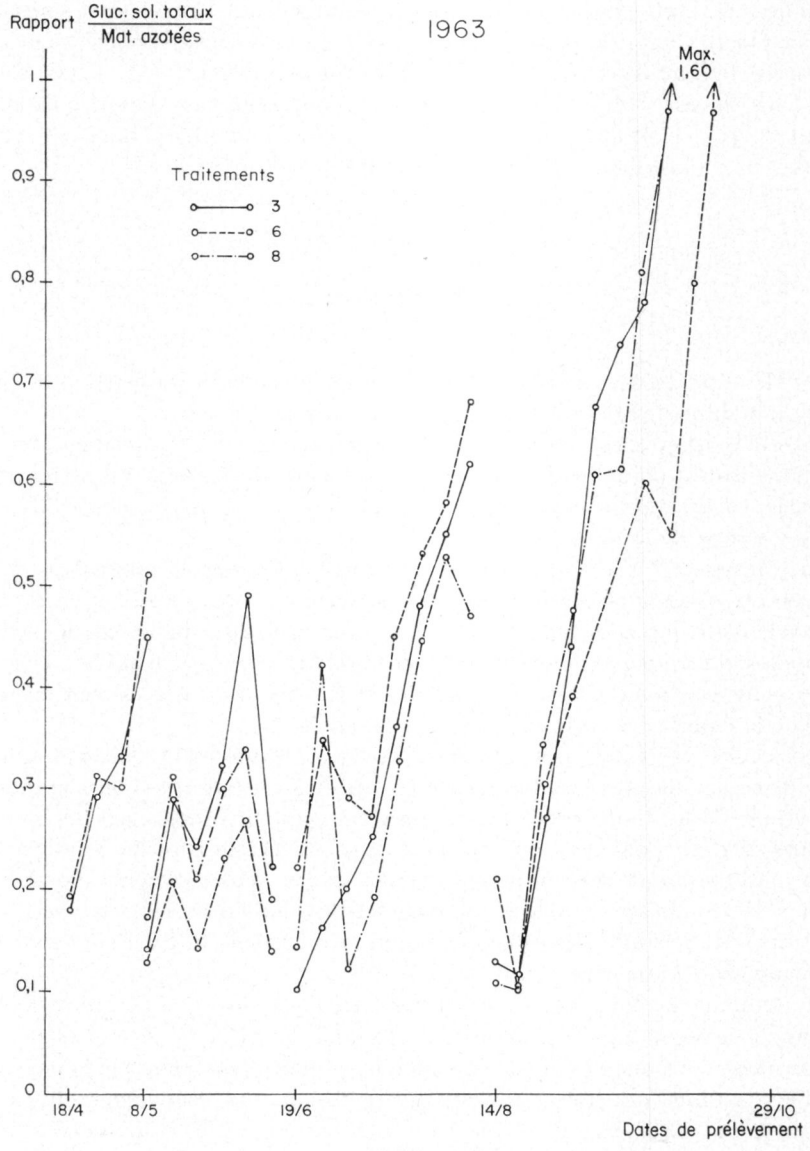


FIG. 7. — *Variations du rapport* $\frac{\textit{glucides solubles}}{\textit{matières azotées}}$ *au cours de la végétation du Dactyle* Floréal *pour des traitements azotés variables*

littérature. Nous pensons que ce fait est une caractéristique variétale, le Dactyle *Floréal* sur lequel nous avons expérimenté se situant à un niveau très différent du Dactyle S^{26} (GAUSSÈRES, 1965) et du Dactyle *15* danois semi-tardif (FAUCONNEAU, 1955).

Au premier cycle, les valeurs se trouvent en augmentation au fur et à mesure des prélèvements et comprise, pour les différentes valeurs d'azote apportées, entre 0,20 et 0,50 avec des variations régulières comprises entre 0,15 et 0,50 au deuxième cycle, un peu plus élevées vers la fin du 3e cycle et en augmentation régulière du début à la fin du 4e cycle d'automne pour atteindre 1,60 à la fin de celui-ci dans le traitement ayant reçu le moins d'azote à ce cycle végétatif.

CONCLUSION

Les résultats exposés dans les deux parties de ce mémoire permettent de préciser un certain nombre de faits relatifs à la physiologie du Dactyle.

Les différents cycles végétatifs se caractérisent, au cours des années étudiées, très différentes du point de vue climatique, par des vitesses plus ou moins grandes des synthèses glucidiques et protidiques suivant que l'on s'adresse aux cyles de printemps ou à ceux d'été ou d'automne.

Au printemps, où les phénomènes caractéristiques sont la montaison et la floraison, on observe une diminution rapide des teneurs en azote total et en azote protéique de la matière sèche correspondant à une augmentation du niveau des synthèses de composés glucidiques condensés : cellulose probablement entre autre. Les glucides solubles sont en quantité assez importante et les valeurs trouvées sont en relation inverse de la quantité d'azote apportée par la fertilisation.

Aux cycles végétatifs suivants caractérisés essentiellement par une croissance foliaire devenant de plus en plus rapide au fur et à mesure que l'on s'approche de l'été, période où les températures moyennes sont plus favorables aux réactions biochimiques, surtout pour les composés azotés, les synthèses protidiques à partir des nitrates absorbés sont beaucoup plus rapides et les accumulations transitoires de nitrates et de composés organiques simples tels que amino-acides et amides, faibles. Ces valeurs sont très influencées au printemps et moins en été par l'importance de la fertilisation azotée apportée aux plantes.

En automne, les teneurs en azote varient très peu alors que les glucides solubles augmentent de façon rapide et importante jusqu'à l'arrêt de la végétation.

La valeur moyenne des glucides réducteurs solubles, de faible poids moléculaire, reste très constante du début à la fin de la végétation et se trouve peu influencée par le niveau azoté. Ceci démontre que les variations importantes observées dans les glucides solubles totaux sont imputables à la présence transitoire de corps déjà plus condensés (fructosanes de poids moléculaire faible). Cette idée est confirmée par l'examen des résultats correspondant aux variations du saccharose pour lequel on n'observe pas d'accumulation mais des alternances très rapides de synthèse et de dégradations.

Si l'on considère ces résultats non plus sous un angle physiologique mais sous

l'aspect « qualité » du produit récolté, il est possible de faire un certain nombre d'observations.

Les glucides varient de façon importante en fonction des quantités d'azote apportées et les valeurs trouvées sont en raison inverse de ces quantités, ce qui peut modifier de façon importante la digestibilité de l'herbe produite. Il est possible d'autre part, par une technique culturale appropriée, par exemple en retardant l'apport de la fertilisation azotée sur les plantes coupées, d'obtenir une métabolisation plus rapide de cet azote en composés organiques, ce qui évite des accumulations transitoires de nitrates très importantes et de récolter, à la fin du cycle végétatif considéré des plantes beaucoup plus riches en protéines pour une même quantité de matière sèche produite à l'unité de surface. Dans ce cas, pour une même quantité d'azote apportée, le rendement de l'azote transformé était beaucoup plus élevé et le poids de matière sèche produite à l'hectare étant le même, la quantité de protéines brutes synthétisées se trouve multipliée par 1,5 à 1,75 pour une fertilisation azotée moyenne.

Ce fait expérimental permet de mettre en évidence une modification importante de la composition et donc de la qualité nutritionnelle du produit récolté.

Reçu pour publication en avril 1968.

SUMMARY

STUDY OF VARIATIONS OF THE PROTEIN AND GLUCIDE COMPOSITION OF THE ABOVE-GROUND PORTION OF DACTYLIS (INFLUENCE OF NITROGEN FERTILIZERS) (2nd PART)

The variations of the protein and carbohydrate metabolism during the vegetation period have been investigated on a field trial of *Dactylis* with varying levels of nitrogen fertilizing. Increased doses of nitrogen given to the plants lead to brief and high accumulations of nitrates when the protein synthesis is slowed down by a low mean temperature.

If the nitrogen fertilizing is carried out with a delay of a fortnight after the mowing, the metabolic transformation of nitrates into organic compounds is very quick and for more important for the same amount of nitrogen given to the plants ; and thus, at the time of mowing, the amount of synthethized protein is much higher. The level of soluble carbohydrates found in plants is always inversely proportional to the supplied and metabolized amounts of nitrogen.

ZUSAMMENFASSUNG

ZUR VERÄNDERUNG DER EIWEISS-UND KOHLENHYDRATGEHALTE IN DEM SPROSS DES KNAUELGRASES (EINFLUSS DER STICKSTOFFDUNGÜNG) (II. TEIL)

In einem Feldversuch mit *Dactylis glomerata*, welcher verschiedenen Stickstoffdüngungen unterworfen war, wurden die Veränderungen der Eiweiss-und Kohlenhydratstoffwelchsel im Laufe der Vegetationsperiode untersucht. Die Steigerung der Stickstoffmengen, welche den Pflanzen zugeführt wurden, ruft hohe zeitliche Anhäufungen von Nitraten hervor, wenn die Eiweisssynthese durch eine niedrige Mitteltemperatur beinflusst wird.

Wenn die Stickstoffdüngung um 14 Tage nach dem Mähen verspätet wird, erfolgt die Metabolisierung der Nitrate zu organischen Verbindungen viel schneller und stärker bei gleichen Mengen an zugeführtem Stickstoff, und dadurch wird am Mahdtermin die Menge an synthetisiertem Eiweiss viel höher. Die Gehalte der Pflanzen an löslichen Kohlenhydraten sind immer in umgekehrtem Verhältnis zu den Mengen an zugeführtem und metabolisiertem Stickstoff.

РЕЗЮМЕ

Изучение изменений белкового и углеводного состава надземных частей ежи. (Влияние азотных подкормок.)

Ж. М. ЛЕФЭБВР, ЕЛИЗАВЕТА ЖОЛИЭ.

В опыте с ежой « Флореаль » возделывавшейся в полевых условиях и получавшей различные азотные подкормки, авторы исследовали изменения белкового и углеводного метаболизма за время вегетационного периода. Увеличение доз азотных подкормок приводит к крупным, временным накоплениям нитратов в случаях слабой средней температуры, замедляющей синтез белков.

Если азотные удобрения вносились после укоса, с пятнадцатидневным запозданием, метаболизация нитратов в органические соединения происходила с большой скоростью и в более крупных масштабах, чем для тех-же количеств азота внесенных прямо под растения; благодаря этому, в эпоху укоса количество синтетизованных белков оказывалось намного большим. Содержание растворимых углеводов найденных в растении всегда обратно пропорционально количествам внесенного и метаболизованного азота.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BACH D., 1932. Dosage de l'ammoniaque par entraînement à la vapeur d'eau dans le vide. *Bull. Sci. Pharmacol.*, **39**, 607-614.

FAUCONNEAU G., JARRIGE R., 1955. Quelques problèmes physiologiques de l'utilisation des fourrages. *C. R. 5e journ. étude de la F. E. Z., Publ. nº 6 F. E. Z.*

GAUSSERES B., 1965. Étude des variations des teneurs en glucides cytoplasmiques et membranaires du Dactyle. *Ann. Biol. anim. Biochim. Biophys.*, **5**, 361-381.

LEFEBVRE J. M., JOLIET E., 1967. Étude des variations de la composition protidique et glucidique des parties aériennes du Dactyle (1e partie). *Ann. agron.* **18**, 529-543.

LEFEBVRE J. M., 1967. Influence de la fertilisation azotée sur les variations de la composition en composés protéiques et non protéiques des parties aériennes de *Dactylis Glomerata L. Colloque FAO/AIEA sur l'emploi des radioisotopes dans les études sur le métabolisme de l'azote dans les rapports sol-plantes-animaux*, Vienne 1967.

MOYSE A., 1950. Respiration et métabolisme azoté (*Etude de physiologie foliaire*), Hermann et Cie, Ed. Paris.

SOMOGYI M., 1937. A reagent for the copper-iodometric determination of very small amounts of sugar. *J. biol. Chem.*, **117**, 771-776.

SOMOGYI M., 1952. Notes on sugar determination. *J. biol. Chem.*, **195**, 19-23.

VICKERY H. B., PUCHER G. W., CLARK H. E., CHIBNALL A. C., WESTALL R. G., 1935. The determination of glutamine in the présence of asparagine. *Biochem. J.*, **29**, 2710-2720.

RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 27, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles séparées seront utilisées pour les références bibliographiques, les tableaux, les légendes des figures et graphiques, etc.

Au début de chaque mémoire, on indiquera : — *le titre du mémoire :* il ne devra pas comporter d'abréviation ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs,* précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de... ; — *le nom de l'établissement,* dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

Les mémoires seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :
a) *sommaire :* résumé suffisamment précis pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction* dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé,* en donnant sous une forme concise, tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats* à présenter de la manière la plus brève possible ; e) *discussion et conclusion ;* f) *résumé* destiné à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour les collaborations, les fonds, les dons... ; h) *références bibliographiques.*

Les travaux originaux en anglais doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français très *complet.* Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

Pour les autres documents (notes, mises au point, revues, rapports, etc.) l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

Les références bibliographiques doivent être citées dans le texte de la manière suivante : (DUPONT et DUVAL, 1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de : et *al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

Pour les articles : le (s) nom (s) de (s) auteur (s) suivi (s) des initiales du (des) prénom (s) ; la date de parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatre langues mentionnées) ; le titre du périodique en abrégé, selon la World List of Scientific Periodicals, ou le Bulletin Signalétique du C.N.R.S. ; le volume ; la première et la dernière page de l'article.

Pour les ouvrages : le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés, et, si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera en plus le nom de l'auteur du chapitre cité, le nom des rédacteurs principaux, précédé de la mention « in », le titre de l'ouvrage.

La mention de « communication personnelle » ou « données non publiées » etc., doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d' « Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies, doivent être fournis à part. Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérotations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponibles est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit.

Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur feuille séparée, et porter les numéros des figures.

Les graphiques, schémas, cartes, dessins d'appareils seront envoyés *à l'état de projets,* leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5, *soit* × 0,25.

Il est rappelé que le format utile des Annales est : 19 × 12,5 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

Photographies : Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos 9 × 12, 4 photos 9 × 5,5, 6 photos 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible après clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur feuilles séparées et porter les numéros des figures.

Correction des épreuves : les auteurs recevront une épreuve à corriger. Les corrections « d'auteur » ne sont autorisées que sur le premier jeu d'épreuves.

Envoi du manuscrit : M. HENIN, Centre national de Recherches agronomiques, 78 - Versailles, France. On demande deux exemplaires.

Le Directeur de la Publication : M. L. CAGNAC

Imprimerie Bussière à Saint-Amand (Cher), France. — 10-1968

Dépôt légal : 4e trimestre 1968. N° d'impression : 2575.

ANNALES
AGRONOMIQUES

VOLUME 19 1968 NUMÉRO 4

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE
149, rue de Grenelle, PARIS-7e

Reproduction, même partielle, interdite sans autorisation des auteurs et de l'Institut national de la Recherche agronomique à l'exception des sommaires et résumés.

Ann. agron., 1968, **19** (4), 403-414.

STABILITÉ STRUCTURALE ET BILAN HYDRIQUE DU SOL. INFLUENCE DU CLIMAT ET DE LA CULTURE

M. SEBILLOTTE
avec la collaboration technique d'Anne EYRAL et M. TESSIER

Laboratoire de Recherches de la Chaire d'Agriculture,
Institut national agronomique, 16, rue Claude-Bernard, 75 - Paris (5e)

SOMMAIRE

Sur certaines parcelles d'un dispositif expérimental, implanté dans la Dombes et destiné à l'étude de l'influence de différents apports de matière organique au sol dans le cadre de rotations culturales, on a testé durant trois ans la stabilité de la structure. On a pu, ainsi, mettre en évidence l'existence d'une liaison entre la stabilité structurale appréciée par le taux d'agrégats benzène stables en novembre et la pluviométrie des mois de septembre et octobre. L'intensité d'action du climat dépend de la culture en place et des techniques culturales ; ainsi le taux d'agrégats benzène stable est fonction de l'histoire hydrique de la parcelle durant une certaine période.

INTRODUCTION

La stabilité de la structure conditionne, sous un climat donné, le comportement des sols. Sa connaissance permet de prévoir l'évolution du profil cultural et d'opérer, alors, un choix raisonné des techniques de travail du sol.

Cependant, s'il en est bien ainsi d'une manière générale, les agriculteurs savent bien que la résistance des mottes de terre à l'action dégradante des pluies, surtout dans les limons battants, est plus élevée après un été sec. Ils ont aussi observé qu'une période de dessiccation après un semis favorisait la conservation des mottes lors de l'action ultérieure des précipitations. Le fait que les mottes de terre atteindront plus tardivement l'humidité qui permet le déclenchement de la dégradation explique-t-il ces différences de comportement ou y-a-t-il une action propre de la dessiccation sur la stabilité de la structure ?

Un dispositif expérimental, implanté en 1963 dans la Dombes, a pour objectif l'étude de différents modes de restitution de matières organiques et leurs conséquences, à travers 3 rotations culturales, sur les cultures et le comportement du sol. Pour pouvoir dégager d'éventuelles interactions entre le climat et les traitements, toutes les cultures sont présentes chaque année ; on a donc tout naturellement étudié l'évolution de la stabilité structurale depuis le début de l'essai.

MÉTHODES

La stabilité structurale est appréciée sur des échantillons moyens (1) de la couche arable qui sont toujours prélevés au mois de novembre pour éviter l'effet des variations intra-annuelles signalées par plusieurs auteurs (HÉNIN, 1938 ; HÉNIN et TURC, 1949 ; MONNIER, 1965).

Les échantillons sont séchés à l'air à une température de 15 à 20° puis soumis aux tests de stabilité structurale de S. HÉNIN et *al.* (1960). Ces tests consistent à peser les agrégats qui, après divers prétraitements (air, alcool, benzène), résistent à l'action dégradante d'un tamisage sous l'eau. Dans le cas de limons pauvres en argile (2), ce sont surtout les propriétés liées aux matières organiques qui entraînent des variations de stabilité et c'est le prétraitement au benzène qui met le mieux en évidence leur action (MONNIER, 1965). On ne s'intéressera donc ici qu'aux agrégats prétraités au benzène qui résistent au tamisage sous l'eau ; ils sont exprimés en p. 100 du poids de l'échantillon après avoir été diminués des sables grossiers qui ne passent pas au tamis à cause de leur taille : ces agrégats sont notés AgB.

RÉSULTATS

Les taux d'agrégats benzène observés depuis trois ans sont très variables. Mais, pour une même culture, à la même place dans la rotation, les teneurs en agrégats benzène stables sont faibles si le prélèvement a été effectué après une période humide, elles sont élevées dans le cas contraire. On sait aussi qu'au cours de chaque année la stabilité augmente en été, c'est-à-dire à la saison sèche. On a recherché s'il existait une liaison entre la teneur en agrégats benzène stables et les précipitations durant les mois précédant la prise des échantillons. Les prélèvements étant effectués en novembre, on a décidé de ne pas tenir compte des pluies au cours de ce mois, en faisant l'hypothèse qu'elles étaient trop proches de la date d'échantillonnage pour jouer un rôle ; on reviendra dans la discussion sur cette hypothèse.

Sur la figure 1 sont portées, par parcelles ayant la même place dans la rotation, les teneurs en agrégats benzène stables en fonction de la somme des précipitations des mois de septembre et octobre de chaque année de prélèvement. On note une liaison linéaire entre ces deux variables dans les cas suivants : prairies temporaires de 1 et 2 ans, blé déchaumé avec ou sans enfouissement de paille. On a calculé

(1) Ces prélèvements sont particulièrement délicats à réaliser ; ils doivent refléter aussi parfaitement que possible la distribution des racines dans le sol, sinon toute analyse ayant trait à la matière sera erronée.

(2) Ces sols renferment environ 2,5 p. 100 de sables grossiers, 12,5 p. 100 de sables fins, 5,4 p. 100 de sables très fins, 23 p. 100 de limons et 8 p. 100 d'argile.

les équations de régression dans les trois cas pour lesquels on avait trois années d'enregistrement (les précipitations sont notées P et exprimées en millimètres) :

— prairie de 1 an :

$$AgB = 9{,}57 - 0{,}029\ P$$ hautement significatif

— blé déchaumé sans paille :

$$AgB = 4{,}75 - 0{,}010\ P$$ significatif

— blé déchaumé avec paille :

$$AgB = 3{,}58 - 0{,}006\,2\ P$$ non significatif

(Les calculs portent sur 24 résultats pour la prairie, sur 12 pour chaque blé).

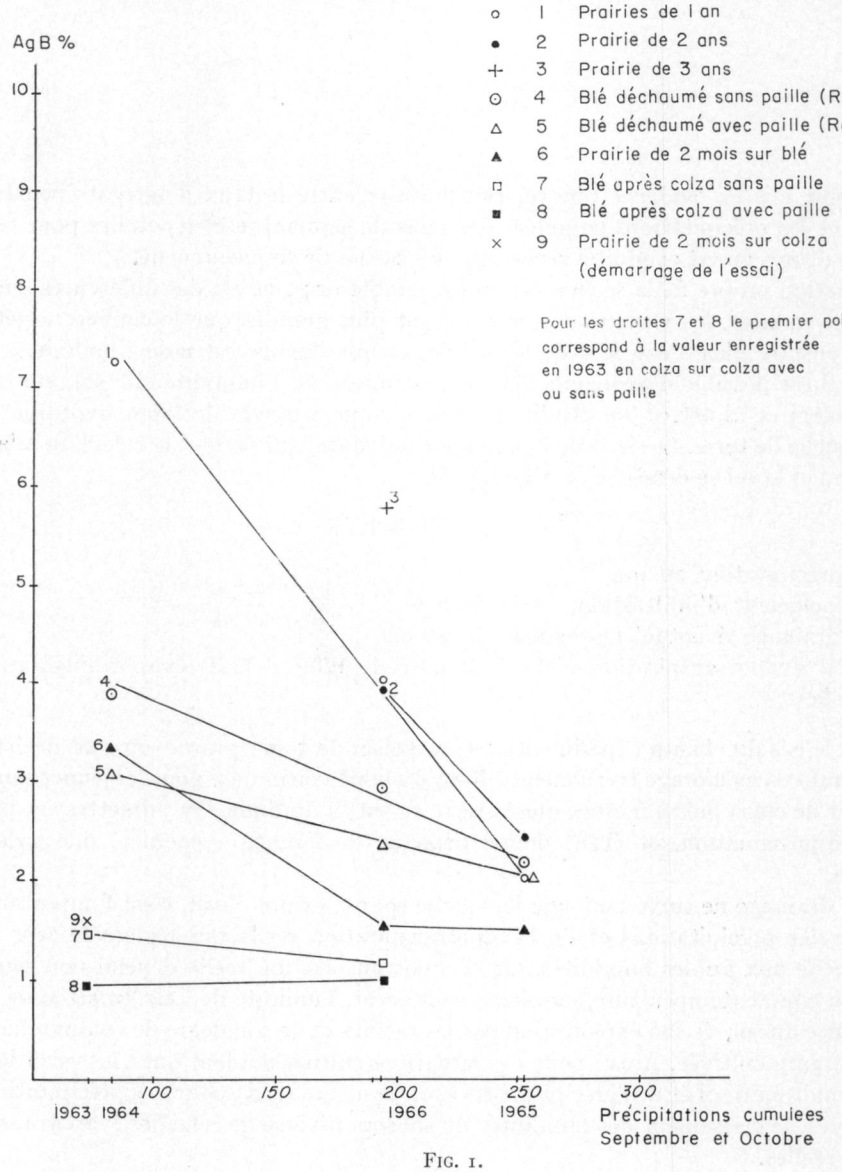


FIG. 1.

L'influence négative de la pluie, en septembre et octobre, sur la teneur en agrégats benzène stables est significative dans le cas des prairies de 1 an et du blé déchaumé sans enfouissement de paille ; elle est plus forte pour les prairies (les coefficients de P sont significativement différents : probabilité de t : 0,02). La droite reliant les points correspondant aux deux seules années de prélèvements sur prairie de deux ans, est sensiblement confondue avec celle des prairies de 1 an.

Il n'y a pas d'influence significative des précipitations dans le cas du blé déchaumé avec enfouissement de paille. Il en est de même pour les parcelles de prairies et de blé respectivement ensemencées 3 mois et 1 mois avant le prélèvement (fig. 1).

DISCUSSION

Ayant mis en évidence une relation linéaire entre le taux d'agrégats benzène stables et les précipitations cumulées des mois de septembre et d'octobre pour certaines cultures on est conduit à rechercher les causes de ce phénomène.

L'action propre de la sécheresse du sol semble responsable des différences enregistrées : en effet, les variations sont d'autant plus grandes que le couvert végétal évapotranspire plus d'eau (cas de la prairie) et que l'année est moins humide.

Or il est possible d'avoir une idée de l'évolution de l'humidité du sol, sur ses 20 premiers centimètres, en étudiant, pour chaque parcelle, le bilan hydrique de cette couche de terre. Le signe de l'expression suivante, qui permet le calcul du bilan, indiquera si le sol se dessèche ou s'humidifie :

$$Y = aP - D - ETR$$

P précipitation en mm

a coefficient d'infiltration, varie de 0 à 1

D drainage éventuel au-dessous de 20 cm

ETR évapotranspiration réelle de la parcelle, ETR $\leqslant$ ETP (évapotranspiration potentielle)

Dans le cas du champ expérimental, a est voisin de 1 sur prairie ou sur déchaumage sauf en cas d'orage très violent ; il est d'abord voisin de 1 pour les jeunes semis de blé et de colza puis à mesure que la terre se bat, il diminue. On admettra en première approximation, et étant donné l'époque de l'année concernée, une valeur unitaire.

Le drainage ne survenant que lorsque le sol est saturé d'eau, c'est l'importance relative des précipitations et de l'évapotranspiration réelle qui réglera le sens du phénomène aux faibles humidités. Or l'évapotranspiration réelle dépend non seulement du climat (température, ensoleillement, vent, humidité de l'air,) mais aussi de l'humidité du sol, de son exploitation par les racines et de son degré de recouvrement par la plante cultivée. Ainsi, pour des situations culturales identiques, les variations de l'humidité du sol et des précipitations sont de même sens ; pour des précipitations identiques, le classement des humidités du sol sera inverse de celui des évapotranspirations réelles.

Les bilans hydriques des différentes cultures, au cours des trois années, sont alors aisément prévisibles. En effet :

1. ce sont les parcelles recouvertes de prairie qui évapotranspirent le plus, leur sol sera le plus desséché. En année pluvieuse, si les précipitations sont suffisantes (1965), toutes les parcelles ont une humidité voisine, celle de la capacité au champ. Comme les recouvrements du sol par les plantes sont voisins pour des prairies de 1 ou 2 ans le bilan hydrique est le même dans les 20 premiers centimètres (l'observation autorise à admettre des enracinements comparables dans cette épaisseur de sol). En année très sèche l'humidité du sol sera inférieure ou égale à celle du point de flétrissement.

2. les parcelles de blé qui viennent d'être déchaumées évapotranspirent beaucoup moins que les prairies car la densité du couvert végétal (adventices et repousses de blé) est très inférieure, donc ETR est plus petit. Par ailleurs, lorsqu'il y a enfouissement de paille, il y a souvent moins de repousses d'adventices et de blé après les déchaumages et la part de la paille restée en surface a joué un rôle de mulch ce qui diminue encore ETR. Ces parcelles seront donc plus humides que celles de prairie en année à faible pluviométrie et elles seront plus rapidement à la capacité au champ en année pluvieuse. On sait aussi que la couche de terre déchaumée est toujours plus humide que la partie non travaillée.

3. les parcelles semées en prairie, en colza ou en blé à la fin de l'été ont été travaillées sur tout l'horizon de sol qui sera prélevé. ETR est très faible car le couvert végétal est peu dense et les racines n'exploitent pas encore tout le sol travaillé. Ces parcelles seront les plus humides, elles auront une teneur en eau proche de celle de la couche déchaumée des parcelles précédentes. L'influence du climat est négligeable.

On disposait de quelques mesures d'humidité du sol ; il était alors intéressant de vérifier si elles étaient en accord avec le sens probable des bilans hydriques. Le tableau ci-dessous permet la comparaison prairie-blé déchaumé.

Années	Cultures		
	Prairies (%)	Blé déchaumé	
		sans paille (%)	avec paille (%)
1966 (humidité moyenne de 0 à 20 cm)			
21 septembre	7,5		17,9
16 novembre	25,50	25,2	25,7
1967 (humidité à 15 cm)			
10 novembre	17,6 (1)	20,2 (1)	21,2 (1)

(1) Ces trois humidités diffèrent significativement (24 résultats).

En septembre 1966, les parcelles de prairie sont beaucoup plus sèches que les autres mais ensuite la forte pluviométrie d'octobre (148 mm) égalise les niveaux d'humidité ; par contre, en 1967 après un mois de septembre pluvieux (110 mm), la

sécheresse relative d'octobre (30 mm) permet de constater des différences importantes (hautement significatives) lors du prélèvement en novembre. En 1967, on constate que pour les parcelles de blé ce sont celles qui ont été déchaumées sans enfouissement de paille qui sont les plus sèches : la différence est encore de 1 p. 100 d'humidité alors qu'il est tombé 29 mm dans les dix jours précédant le prélèvement. Ces résultats sont donc en plein accord avec l'étude précédente des bilans hydriques.

Pour les parcelles semées en prairie, colza ou blé dans les mois précédant le prélèvement on ne dispose de mesures qu'en novembre 1966 :

Prairie implantée en	août	27,8 p. 100	d'humidité
Colza —	septembre	30,3 p. 100	—
Blé —	octobre	28,5 p. 100	—

Elles sont nettement plus humides que celles de prairie ou de blé déchaumé et on peut penser que cela est vrai depuis les pluies qui ont suivi le travail du sol. C'est la prairie âgée de 2 mois qui est la moins humide, c'est-à-dire la culture qui couvre le plus le sol et qui est la plus âgée. En année très sèche, on peut penser que la prairie âgée de 2 mois évapotranspirera assez d'eau et donc dessèchera suffisamment le sol pour modifier la stabilité de la structure : c'est ce qui se passe en 1964 ; pourtant en 1963, au démarrage de l'essai, bien que l'année soit aussi sèche, ce phénomène ne s'observe pas.

Ainsi l'étude des bilans hydriques dans les divers cas conduit à des classements des humidités des parcelles qui sont dans le même ordre et qui varient dans le même sens que les taux d'agrégats benzène. La dessiccation du sol semble bien liée à l'action du climat mais elle est modulée par tous les facteurs qui interfèrent sur son humidité, en particulier la nature de la culture (recouvrement du sol, stade végétatif), l'importance des adventices et des résidus de récolte, l'état structural du sol.

Quel mécanisme relie la dessiccation du sol et l'augmentation du taux d'agrégats benzène stables ? En premier lieu, il était utile de vérifier si ces variations ne se retrouvaient pas sur les teneurs en agrégats stables après les autres prétraitements, à l'air et à l'alcool. Voici quelques-unes des valeurs enregistrées :

Cultures	Taux d'agrégats					
	Alcool			Air		
	1963	1965	1966	1963	1965	1966
Blé déchaumé						
Avec paille	2,7	3,7	2,8	1,7	2,1	1,1
Sans paille	2,5	2,7	3,5	1,4	1,8	1,7
Prairie						
2 ans	—	4,4		—	2,4	
3 ans	—	—	4,2	—	—	2,2
Pluviométrie (mm)						
Cumulées septembre et octobre	71	253	193			

L'absence de variation systématique (1) permet d'affirmer qu'il n'y a pas de différence de cohésion de la terre à l'état humide suivant les cultures et les années. En particulier, les matières organiques du sol, dont l'action est mise en évidence par les valeurs des taux d'agrégats benzène stables, n'ont pas agi en modifiant cette cohésion.

MONNIER (1965) a montré que le taux d'agrégats benzène stables variait en raison inverse de la mouillabilité du sol, due en grande partie à la fraction liée de la matière organique. De plus des travaux en cours au Laboratoire des Sols de l'I.N.R.A., mettent clairement en évidence que l'influence des conditions de dessiccation sur le taux d'agrégats benzène est due à une variation dans la mouillabilité de la matière organique.

On notera qu'il suffit d'une période pluvieuse de quelques semaines pour diminuer l'effet positif de la sécheresse d'été, comme cela a été le cas en 1966 dont le mois d'octobre pluvieux a en partie effacé l'effet du mois de septembre sec, c'est d'ailleurs ce qui se produit chaque année au cours de l'hiver : la diminution de mouillabilité est réversible. Par ailleurs, S. PÉRIGAUD (1963) a souligné, après d'autres auteurs, l'influence de l'humidité au moment du prélèvement et la variation très rapide de la stabilité de la structure sous l'action de la pluie. Or, dans nos résultats les valeurs d'agrégats benzène stables de 1965, correspondant à des prélèvements relativement secs, sont inférieures à celles de 1966 dont les prélèvements étaient beaucoup plus humides. De plus, nous n'avons pas pu mettre en évidence de liaison linéaire en prenant les sommes de pluies cumulées sur les 8, 15 ou 30 jours qui ont précédé le prélèvement, or, ces précipitations rendent assez bien compte de l'humidité au moment de la prise d'échantillon. On peut penser que s'il y a une action de l'humidité au moment du prélèvement elle n'est pas déterminante ; et lorsqu'elle est liée au taux d'agrégats benzène stables, c'est dans la mesure où *elle traduit l'histoire hydrique antérieure de la parcelle, qui est prédominante.*

Le fait que tous les échantillons soient séchés à l'air, dans des conditions identiques après leur prélèvement, confirme que, dans l'action du climat sur la stabilité structurale, le rôle prépondérant revient à l'histoire hydrique du sol et non à sa seule

Culture	1	2	3	4
Matière organique :				
F fraction libre	1,60	1,48	1,51	1,56
F fraction liée	8,14	8,23	8,01	8,10
T total	9,75	9,71	9,52	9,66
AgB (%)	2,95	2,37	1,0	1,20

1 : Blé déchaumé sans paille
2 : Blé déchaumé avec paille
3 : Blé après colza sans paille
4 : Blé après colza avec paille

(1) Cette absence de liaison entre les agrégats-air et le climat explique probablement que l'influence de ce dernier sur la stabilité structurale, que nous avons mise en évidence, ait encore récemment été niée (KEMPER et KOCH, 1966) ; cela justifie une fois de plus l'intérêt de la méthode de détermination mise au point par HÉNIN et *al.* (1960).

dessiccation. En effet, dans le cas contraire, les tests de stabilité exécutés au laboratoire devraient donner des taux d'agrégats benzène stables identiques pour une même année, au moins lorsque les teneurs en matière organique sont voisines. Les résultats du tableau de la p. 409, pour l'année 1966, montrent que ce n'est pas le cas.

Ces différences de stabilité traduisent donc l'influence de facteurs antérieurs au séchage au laboratoire. *Les conditions de la dessiccation au cours des mois qui précèdent le prélèvement sont décisives, tant par l'intensité de la sécheresse que par sa durée.* L'évolution du comportement de la matière organique qui en résulte peut être due à une activité microbienne ou à des mécanismes physico-chimiques.

Pour que l'hypothèse d'une activité biologique, responsable de ces phénomènes, soit retenue, il faut montrer qu'elle existe dans le sol aux faibles humidités, qu'elle est spécifique de ces faibles humidités et qu'elle entraîne toujours une augmentation de la stabilité structurale dans les conditions de sol de l'expérience. Les travaux de DOMMERGUES (1962), sur sols tropicaux, ont montré que, même aux très basses humidités, pF compris entre 4,2 et 5,7, il existait une vie bactérienne et fungique. Cette activité aboutit, après apport de matière organique fermentescible au sol, à sa transformation, à une augmentation de stabilité structurale après 6 semaines d'incubation puis à une diminution vers 10 semaines. Mais cette étude *ne permet pas de conclure à une activité spécifique des microorganismes aux faibles humidités* ; si elle n'autorise pas le rejet de l'hypothèse, elle n'incite pas, non plus, à la reconnaître comme prépondérante.

Les travaux actuellement entrepris au Laboratoire des Sols (I. N. R. A., Versailles) montrent que les conditions de dessiccation des échantillons (température, vitesse de séchage) entraînent des modifications considérables de mouillabilité. Le temps nécessaire pour obtenir ces variations est très court, il exclut l'intervention majeure des microorganismes du sol. D'ailleurs, on observe, aux champs, de tels phénomènes lors de la dessication des tourbières.

Les résultats actuels ne permettent pas de conclure et de choisir une des deux hypothèses ; il est d'ailleurs possible qu'elles interviennent simultanément. Il est cependant important de noter qu'il n'est pas forcément nécessaire de faire appel à l'activité microbienne pour expliquer les effets enregistrés.

Une confirmation indirecte de l'action du climat est fournie par le comportement des prairies. Il a été montré (MONNIER, 1965) qu'elles ne provoquaient une amélioration sensible de la stabilité structurale, par rapport à un témoin cultivé, qu'après deux années d'implantation. En 1966, les taux d'agrégats benzène stables sont les suivants :

	Agrégats-benzène (%)
Sur prairie de 1 an	4,05
Sur prairie de 2 ans.....	3,90
Sur prairie de 3 ans.....	5,76

La concordance de ces résultats avec ceux des travaux cités permet de supposer que la différence de stabilité structurale entre les prairies de 1 et 2 ans et les cultures annuelles est due uniquement à l'action du climat à travers la végétation prairiale, telle qu'elle a été mise en évidence. A partir de trois ans, l'augmentation de stabilité structurale sous prairie résulterait de deux phénomènes : action propre des matières organiques de la prairie et dessiccation du sol au cours de l'été.

Sur le plan méthodologique les conséquences de ces faits sont importantes. En effet il devient impossible de se contenter, lors d'une étude de la stabilité structurale d'un sol, de la détermination du point zéro et d'un test en fin d'expérience. Il faut au contraire prévoir des prélèvements chaque année, à la même période, afin de dissocier, grâce à l'utilisation des méthodes statistiques, l'effet du climat de celui des traitements. Il est peu recommandable de vouloir étendre l'intervalle entre deux prélèvements car on diminuera la précision de l'étude statistique et les traitements risqueront de ne pas apparaître significativement différents.

Mais une autre conséquence se dégage de ces faits : il est possible de créer une augmentation de stabilité structurale par un traitement et de ne pouvoir l'enregistrer à cause du choix de la date de prélèvement. Ceci implique soit la multiplication des dates de prélèvements pour *toutes* les parcelles, soit la mise en œuvre d'autres contrôles du comportement du sol comme l'observation de sa surface ou l'établissement de courbes d'infiltration superficielle de l'eau. On peut aussi penser à modifier la date des prélèvements pour les effectuer en été au moment où le sol est desséché.

CONCLUSION

La dessiccation du sol, durant une longue période, entraîne, à travers des mécanismes encore mal précisés, une diminution de la mouillabilité de la fraction liée des matières organiques. Or l'humidité du sol dépend du signe du bilan hydrique, lui-même lié, non seulement au climat, mais aux cultures et aux techniques culturales. On a montré que le classement des parcelles opéré à partir de ces bilans est le même que celui obtenu d'après les teneurs en agrégats benzène stables. Ainsi tous les facteurs de *l'histoire hydrique* du sol ont des répercussions sur sa stabilité structurale : l'intensité de l'effet d'une même matière organique ne dépend pas seulement de son taux dans le sol.

On comprend maintenant les comportements du sol rapportés en introduction et l'intérêt de développer, en particulier en terre battante, des techniques de travail du sol qui favorisent la dessiccation des mottes.

Ces faits donnent une nouvelle dimension à la notion de précédent dans une rotation culturale. Une plante cultivée peut intervenir sur la stabilité structurale du sol et modifier, ainsi, son comportement au cours de la culture suivante de deux manières :

— en provoquant des variations de quantité et de qualité dans la matière organique du sol,

— en agissant sur le bilan hydrique du sol, au cours des mois qui précèdent la mise en place de la future culture, par sa présence même ou par les techniques culturales utilisées. En particulier, le problème de la réussite des semis, crucial certaines années en sol battant, est éclairé d'un jour nouveau. La détermination même des successions culturales peut se trouver remise en question.

Mais, dans tous les cas, l'effet immédiat d'une culture ou d'une technique culturale sur la stabilité structurale, effet lié à la dessiccation du sol, dépend évidemment du climat. Il est ainsi nécessaire de raisonner en terme probabiliste l'effet améliora-

teur possible d'une culture ou d'une technique : la détermination judicieuse des successions de cultures apparaît, à nouveau, comme impossible sans une étude fréquentielle du climat (SEBILLOTTE, 1966, 1968).

Reçu pour publication en mai 1968.

REMERCIEMENTS

Que G. MONNIER et son équipe, à qui cette étude doit beaucoup, trouvent ici l'expression de ma gratitude.

Que la Chambre d'Agriculture de l'Ain, la Société Péchiney Saint-Gobain et le CETA de la Dombes qui ont permis, par leur collaboration, l'implantation de l'essai trouvent ici l'expression de mes remerciements qui vont particulièrement à MM. BESSON (Péchiney Saint-Gobain), GASNIER (Chambre d'Agriculture), LASSUS chez qui l'essai est implanté.

SUMMARY

THE STRUCTURE STABILITY AND WATER BALANCE OF SOILS. INFLUENCE OF THE CLIMATE AND OF THE CROP

The author investigates the structure stability of the soil on an experimental device meant to compare the influence of different ways of providing organic matter, in the case of crop rotation on the behaviour of a limy soil with a highly unstable structure.

The structure stability is evaluated according to HÉNIN'S method (1960) in particular by means of the rate of stable benzene aggregates which expresses the action of organic matters.

The first three years of results show that there is, in some cases, a negative lineor relation between the rate of stable benzen aggregates and the sum of rainfall in September and October ; the less it rains during these 2 months the more stable the structure is in November. But this action is more or less important according to the crop. The study of the probable water balances in the course of these 2 months leads to the same classing of the plots as the investigation of the rates of stable benzen aggregates.

The factor responsible for the value variations of the structure stability according to the year is the evolution of the water balance of the plots ; the desiccation in the field during a long time causes a decrease in the wettability of the bound organic matter and thus an increase in the structure stability.

A crop can therefore have an effect on the structure stability in 2 ways :

— by altering the amount of organic matter in the soil and their properties,

— by a more or less direct drying up of the soil or by the cultural techniques applied to the soil.

The special case of a temporary grass land is studied. Before 3 years, they only have an effect on the structure stability by altering the soil humidity ; later, they also come into action, through their effect on the soil organic matter.

These facts are very important for adjusting cultural techniques on a highly unstable soil for which the sowing period is critical and for determining the crop rotations.

ZUSAMMENFASSUNG

STRUKTURFESTIGKEIT UND WASSERBILANZ DES BODENS. EINFLUSS DES KLIMAS UND DER ANGEBAUTEN PFLANZENART

Die Strukturfestigkeit des Bodens wird vom Verfasser anhand einer Versuchsvorrichtung untersucht, welche zum Vergleich des Einflusses verschiedener organischer Stoffzufuhrarten, im Rahmen der Fruchtfolge auf das Verhalten eines Lehmbodens mit höchstempfindlicher Struktur.

Die Strukturfestigkeit wird mit Hilfe der Methode von HÉNIN (1960) besonders durch den Prozentsatz an stabilen Benzenaggregaten, welche die Wirkung der organischen Stoffen widergeben, abgeschtzat.

Die Versuchsergebnisse der ersten 3 Jahre zeigen, dass es in bestimmten Fällen eine negative lineare Beziehung zwischen dem Prozensatz an stabilen Benzenaggregaten und der Summe der im September und Oktober gefallenen Niederschlägen gibt : je weniger es während dieser beiden Monate regnet, desto höher wird die Strukturfestigkeit im November sein. Diese Wirkung hängt aber mehr oder weniger von der angebauten Pflanzenart ab. Die Untersuchung der wahrscheinlichen Wasserbilanzen im Verlauf dieser beiden Monate führt zu derselben Aufteilung der Parzellen wie die Berücksichtigung der Gehalte an stabilen Benzenaggregaten.

Die Evolution der Wasserbilanz der Parzellen ist für die Veränderungen des Strukturfestigkeitswerts in den verschiedenen Jahren verantwortlich.

Die Austrocknung im Felde während einer langen Periode bewirkt eine Herabstezung der Benetzbarkeit des gebundenen organischen Stoffes und ruft dadurch eine Erhöhung der Strukturstabilität hervor.

Der jeweilige Pflanzenanbau kann also auf zweierlei Weise auf die Strukturfestigkeit wirken :

— durch Veränderung der Menge und der Eigenschaften der organischen Substanz des Bodens,

— durch mehr oder weniger ausgeprägte unmittelbare Austrocknung des Bodens oder durch das angewendete Anbauverfahren.

Der Einzelfall der Wechselwiesen ist untersucht worden ; vor Ablauf von drei Jahren wirken sie nur durch Abänderung der Bodenfeuchtigkeit auf die Strukturfestigkeit ein ; später üben sie auch eine Wirkung auf die organischen Bodenstoffe aus.

Diese Tatsachen sind sehr wichtig für die Ausarbeitung von Anbauverfahren auf Böden mit höchstempfindlicher Struktur bei denen der Aussaattermin von grösster Bedeutung ist sowie für die Bestimmung der Fruchtfolge.

РЕЗЮМЕ

Устойчивость структуры и водный баланс почвы.
Влияние климата и рода культуры.

М. СЭБИЙОТТ.

Автор изучал устойчивость структуры почвы на экспериментальной установке предназначенной для сравнения влияния различных способов внесения органического вещества в рамках севооборота, на поведение сильно неустойчивого суглинка. Устойчивость структуры оценивалась по методике Хенэна (1960), и в частности, по проценту бензоло-прочных агрегатов, отражающему действие органического вещества.

Результаты полученные после трех первых лет опыта показывают что в некоторых случаях существует отрицательная линейная связь между процентом бензоло-прочных агрегатов и суммой атмосферических осадков выпавших за сентябрь и октябрь : чем меньше выпадает осадков за эти два месяца, тем больше устойчивость структуры в ноябре. В зависимости от рода культуры действие это более или менее сильно. Изучение вероятных водных балансов в течении этих двух месяцев приводит к той-же классификации делянок, что и в сдучае принятия во внимание бензоло-прочных агрегатов.

Гидрологическое прошлое делянок влияет на изменения величины устойчивости структуры в зависимости от года; полевое подсыхание в течении длительного периода вызывает ослабление смачиваемости органического вещества и приводит к увеличению устойчивости структуры.

Окультуривание может значит действовать на устойчивость структуры двумя способами :

— При помощи изменения количества и свойств органического вещества почвы .

— При помощи прямого, более или менее сильного подсыхания почвы.

Автор рассматривал, в частности, роль временных лугов : в течении первых трех лет они действовали на устойчивость структуры почвы только влияя на ее влажность; позже они проявляли действие также и на органическое вещество почвы.

Все вышесказанное очень важно для разработки агротехники неустойчивых почв, для которой критическим периодом является период посевов, и при установке необходимых себооборотов.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

DOMMERGUES Y., 1962. Contribution à l'étude de la dynamique microbienne des sols en zone semi-aride et en zone tropicale sèche. *Ann. agron.*, **13** (4), 265-324, **13** (5), 391-468.

HÉNIN S., 1938. *Étude physico-chimique de la stabilité structurale des terres.* Thèse, Paris, 1938.

HÉNIN S., TURC L., 1949. Nouvelles observations sur la variation annuelle de la stabilité structurale du sol. *C. R. Acad. Agric.*, 26 octobre 1949. Tome 36 n° 14, 597 - 599.

HÉNIN S., et *al.*, 1960. *Le profil cultural.* S. E. I. A. Paris.

KEMPER W. D., KOCH E. J., 1966. Aggregate stability of soils from western United States and Canada, Colorado Agricultural Experiment Station. *Technol. Bull.*, n° 1355.

MONNIER G., 1965. Action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols. Thèse. *Ann. agron.*, **16** (4, 5), 327-400, 471-534.

PERIGAUD S., 1963. Contribution agronomique à la mise en valeur de la Brenne. Thèse. *Ann. agron.* 1963, **14** (2 et 3), 121-193, 261-377.

SEBILLOTTE M., 1966. Rotations et assolements. « Fertilisation 1966 », n° de juin. *Rev. agric. Fr.*, 169-183.

SEBILLOTTE M., 1968. Rotations culturales. Approche méthodologique d'une politique dynamique. *Journ FNCETA*, janvier 1968. *Dossier cultures assolées.*

Ann. agron., 1968, **19** (4), 415-439.

DYNAMIQUE DE LA GRANULATION DU SOL SOUS PRAIRIE

BUI HUU TRI

Laboratoire des Sols,
Centre national de Recherches agronomiques, 78 - Versailles
Institut national de la Recherche agronomique

SOMMAIRE

De tous les processus qui entrent en jeu dans la « granulation » de la structure d'un sol sous graminées fourragères l'action mécanique réciproque des racines et du milieu semble la moins étudiée. Ce travail s'est attaché à explorer cet aspect du problème et à mettre en évidence les principaux mécanismes qui s'y rapportent.

INTRODUCTION

La structure granulaire est souvent considérée comme caractéristique d'un sol sous prairie. Mais si la granulation, autrement dit la formation des éléments structuraux sous forme de grains ou d'agglomérats arrondis plus ou moins gros sous l'influence des graminées fourragères, est un fait assez répandu, il est à noter aussi qu'elle ne se manifeste pas dans toutes les situations et de la même manière. Ainsi, on a pu remarquer que pour certains sols, la granulation apparaît assez rapidement après l'établissement de la prairie, que pour certains autres elle n'apparaît qu'après une période relativement longue, tandis que pour d'autres encore elle n'apparaît pas du tout. Cette variété de comportements souligne la nécessité de connaître le mécanisme de la granulation si l'on veut être à même de prévoir les conditions de son apparition. Or, il semble que c'est un aspect qui n'a pas été étudié d'une manière approfondie. En effet, si l'importance du phénomène de granulation a été reconnue depuis longtemps et ses conséquences globales ont été étudiées avec soin, la genèse même de la granulation n'a pas reçu une attention comparable. Ainsi, la plupart des travaux qui ont été rapportés dans la littérature portent principalement sur la stabilisation des éléments structuraux qui représente l'action intégrée ou le résultat à un stade avancé de l'action des graminées fourragères sur les sols. Par contre, leur action initiale, c'est-à-dire la façon avec laquelle les racines des graminées effectuent la

formation de ces éléments structuraux à partir d'un sol présentant un état physique donné, reste mal connue.

Manifestement c'est la conception imprécise des types d'assemblage qui caractérisent la structure d'un sol en général et celle d'un sol sous prairie en particulier qui est à l'origine de l'absence des recherches sur cet aspect précis du problème. Pour certains auteurs une agglomération de particules élémentaires assez stable à l'eau s'appelle « ped » tandis que le mot « motte » est réservé aux masses de particules artificiellement formées qui ne sont pas habituellement stables dans l'eau (DONAHUE, 1958). D'autres ont appelé « agrégat » un groupe de 2 ou plusieurs particules primaires liées entre elles d'une manière plus tenace qu'avec les particules qui les entourent (KEMPER et CHEPIL, 1965). Pour MARTIN et collaborateurs (1955) un agrégat est une agglomération ou groupe de particules de sol à l'état naturel et dans laquelle les forces qui retiennent ces particules sont beaucoup plus intenses que celles entre les agrégats adjacents. D'autres encore considèrent comme agrégats les éléments inférieurs à 0,2 mm qui sont stables dans certaines conditions. Ces agrégats sont alors considérés comme de véritables unités caractérisant la « microstructure » du sol. S'ils se groupent de façon plus ou moins lâche formant ainsi des ensembles de dimensions variables pouvant dépasser 10 cm, ils sont appelés « faux agrégats » ou « mottes » et ils constituent la « macrostructure » du sol (DEMOLON, 1960).

On voit bien que ces définitions considèrent suivant les cas comme un élément structural un ensemble faiblement cohérent ou une unité fortement stabilisée. Et c'est parce qu'il n'y a pas de distinction expresse faite sur le comportement d'un ensemble faiblement cohérent et d'une unité fortement stabilisée que la nécessité de les étudier séparément n'a pas été apparente, et que la notion « d'agrégats », de « ped » et de « motte » reste toujours vague et ambiguë.

Il en est de même de la conception concernant l'arrangement de ces unités structurales dans le sol. MARTIN et ses collaborateurs (1955) ont souligné que pour beaucoup d'auteurs les termes « structure du sol » et « agrégation » sont interchangeables. Ceci n'est pas entièrement vrai, spécialement, dans le cas des sols sous prairie parce que la structure de ces sols peut être le résultat soit du groupement, c'est-à-dire de l'agrégation de particules élémentaires ou secondaires en éléments de plus grande dimension, soit de la fragmentation des grosses mottes en agrégats plus petits (MARTIN et *al.*, 1965 ; HARRIS et *al.*, 1966). Le terme agrégation ne représente donc qu'un aspect de la formation de la structure. Or celle-ci est un processus dynamique, c'est-à-dire que les éléments structuraux formés seront soumis à une évolution qui dépend des conditions physico-chimiques et biologiques du milieu. Dans ces conditions, les forces liant les particules élémentaires peuvent varier en intensité. Les assemblages résisteront alors plus ou moins à un traitement donné. Dès lors nous avons renoncé à l'attitude qualitative qui est à l'origine des conceptions « d'agrégat », de « ped » et de « motte » que nous venons de rappeler et qui postulent une discontinuité de nature entre les différents constituants structuraux. Au contraire, nous nous proposons d'appeler éléments structuraux, les différents ensembles de particules séparés les uns des autres par des lignes ou des faces de moindre résistance et existant à un moment donné dans le sol. A partir de cette définition, la méthode expérimentale que nous avons employée pour étudier la dynamique de la formation d'une structure dans un sol sous graminées fourragères consiste à :

— définir le principe et mettre au point une méthode de séparation reposant sur des actions suffisamment ménagées pour faire ressortir les assemblages fragiles ;

— étudier la forme et les dimensions des éléments structuraux qui ont pu être mis en évidence par la méthode choisie dans le but de rechercher des critères pour caractériser un sol sous prairie ;

— délimiter, dans la mesure du possible, les étapes de formation et de stabilisation des éléments structuraux et concentrer l'attention, les processus de stabilisation ayant été étudiés en détail ailleurs (G. MONNIER, 1965), sur l'étude des mécanismes qui entrent en jeu dans l'étape de formation de la structure par les racines des graminées fourragères sur les sols présentant chacun les états initiaux suivants :

a) monoparticulaire, constitué par la juxtaposition des particules primaires sans cohésion appréciables, ou des particules agrégées fines ;

b) continu, représenté par une structure n'ayant pas de lignes ou de faces de moindre résistance ;

c) fragmentaire grossier, représentant un état intermédiaire entre les 2 cas précédents et qui est constitué au départ par des éléments structuraux plus ou moins gros.

I. — MÉTHODES D'APPRÉCIATION DE L'ÉTAT STRUCTURAL

A. — *Détection des éléments structuraux : le test à l'alcool*

Quand un agglomérat de terre se trouve en contact avec de l'eau, il se désagrège plus ou moins rapidement. HENIN (1938) a montré que ceci est dû à la dispersion des argiles (SCHLOESING, 1885) et à la compression de l'atmosphère interne (YODER, 1936) de l'agglomérat causée par l'entrée de l'eau dans les pores. La baisse de cohésion résultant du gonflement entraîne la destruction des agglomérats par l'intermédiaire des mécanismes d'éclatement ; nous rechercherons donc un traitement qui ait un effet aussi peu marqué que possible sur cette propriété.

RUSSELL (1938) a rapporté que l'emploi du tamisage direct des échantillons tels qu'on les trouve au moment du prélèvement (PUCHNER, 1911 ; KEEN, 1933 ; NEKRASSOV, 1934) ou séchés à l'air (MANGELSDORFF, 1929 et VOLKOV, 1933) pourrait être une solution. Toutefois ces méthodes de tamisage direct donnent trop d'importance à des actions secondaires diverses y compris celles qui interviennent lors du prélèvement lui-même.

Une autre méthode consiste à traiter et à tamiser les échantillons dans des liquides organiques. Selon RUSSELL (1938), TIULIN fut parmi les premiers à proposer l'emploi du benzène ou du xylène en 1928. D'autres ont signalé l'intérêt de l'alcool éthylique comme liquide de tamisage (KOEPF, 1961) sans en préciser les raisons. Or, CONCARET (1965) a rapporté que la cohésion d'une terre humidifiée diminue à cause du gonflement et qu'en traitant les agglomérats par des mélanges alcool/eau on réduit l'abaissement de cohésion lié à l'humectation à un degré tel que les variations de la pression interne ont des effets négligeables, les agglomérats se trouvant ainsi plus stables. Il est donc probable que l'action de l'alcool sera plus sélective que celle de l'eau permettant ainsi de mettre en évidence les premières phases de la formation des éléments structuraux.

TABLEAU I

Effet de divers traitements sur le comportement des agglomérats de l'Horizon B de Versailles

Tailles des éléments structuraux (mm)	Traitements																	
	A			B			C			D			E			F		
	Cases lysimétriques et % d'éléments structuraux récupérés																	
	17	19	18	17	19	18	17	19	18	17	19	18	17	19	18	17	19	18
> 3	0,73	0,34	2,00	7,93	5,34	35,80	16,10	13,90	42,80	40,00	49,30	84,40	60,50	62,00	94,50	58,0	60,0	95,0
3-2	0,33	0,13	0,46	2,46	3,33	3,34	4,14	5,20	3,50	3,80	4,60	1,60	5,06	4,66	3,33	4,8	5,0	3,0
2-0,5	2,80	2,80	7,74	33,60	30,90	22,40	34,60	36,50	23,20	24,30	18,60	6,00	21,00	18,50	1,73	20,0	19,0	1,0
0,5-0,2	12,80	15,10	19,30	19,40	20,60	11,30	14,10	15,60	9,86	7,26	7,00	1,53	5,40	5,40	0,13	6,4	6,0	0,5
< 0,2	83,34	81,63	70,50	36,61	39,83	27,16	31,06	28,80	20,61	24,64	20,50	6,47	8,04	9,44	0,31	9,0	10,0	0,4

Note : Les numéros 17, 19, 18 représentent respectivement les cases lysimétriques en jachère, sous culture et sous fétuque élevée.
A = Humectés et tamisés dans l'eau
B = Humectés sous vide et tamisés dans l'eau
C = Humectés dans 60 p. 100 alcool et tamisés dans l'eau
D = Humectés dans 95 p. 100 alcool et tamisés dans l'eau
E = Humectés et tamisés dans 95 p. 100 d'alcool
F = Prétraités avec le chlorure de cétyl pyridinium, humectés par l'eau sous vide et tamisés dans l'eau.

Nous avons observé dans une expérience préliminaire que lorsque l'argile est rendue hydrophobe par une substance telle que le chlorure de cétyl pyridinium, $C_{21}H_{38}NCl$, H_2O (Law Jr, 1966) et que les conditions d'évacuation de l'air sont assurées en opérant sous vide, l'eau peut remplacer l'alcool éthylique et donne des résultats comparables voire identiques. C'est une preuve indirecte du fait que l'alcool éthylique élimine pratiquement les effets de gonflement et de compression, effets qui rendent la méthode du tamisage direct dans l'eau inutilisable. L'étude comparée des divers traitements est résumée dans le tableau 1 qui montre que les traitements au chlorure de cétyl pyridinium et à l'alcool éthylique à 95 p. 100 sont les moins destructeurs. Ils traduisent l'état structural réel d'un sol, c'est-à-dire qu'ils permettent de séparer les éléments structuraux directement visibles dans le sol en place lorsque les conditions d'observation sont favorables. Étant donné la facilité et la rapidité avec lesquelles le traitement à l'alcool peut être réalisé, nous l'avons adopté comme méthode de base pour déceler la présence des éléments structuraux et en évaluer le taux.

Le protocole suivi est le suivant : une prise d'essai de 15 g constituée d'agglomérats séchés à l'air, dont la taille est comprise entre 5 et 10 mm et obtenus par fragmentation de l'échantillon initial, est placée dans un bécher de 600 cm³ de forme basse et recouverte avec 30 cm³ d'alcool éthylique à 95° pendant 1 heure. Les agglomérats sont ensuite versés avec précaution sur un tamis à mailles carrées de 3 mm d'ouverture, qui constitue la partie supérieure d'une colonne de 4 tamis dont les 3 autres ont des mailles de 2 mm, 0,5 mm et 0,2 mm. La colonne est fixée par sa partie supérieure à l'appareil à tamiser de Feodoroff (1960) et plonge dans un bécher de 5 l contenant de l'alcool éthylique à 95° en s'assurant que le niveau de celui-ci dépasse de 0,5 cm la toile du tamis supérieur. Le tamisage, assuré par l'appareil qui déplace la colonne de tamis de haut en bas et vice versa par

TABLEAU 2

Essai de retamisage des éléments structuraux

Nombre de traitements à l'alcool et de tamisages	Horizon B agrégé fin sans herbe	Horizon B agrégé fin, 2 mois sous ray-grass d'Italie	Case lysimétrique n° 17 (Horizon B, 11 ans en jachère)	Case lysimétrique n° 18 (Horizon B, 3 ans sous fétuque élevée)
Poids des éléments structuraux > 3 mm obtenus après chaque tamisage				
Premier (1)	1 g	4,2 g	10,3 g	18,2 g
Deuxième (2)	0,8 g	3,5 g	9,4 g	17,4 g
P. 100 obtenu au 2e par rapport au 1er	80	83,4	91,3	95,5

(1) Prise d'essai = 20 g.
(2) Prise d'essai = poids obtenus à l'issue du 1er tamisage.

un mouvement hélicoïdal dans l'alcool, comporte 30 coups effectués en 30 secondes. La colonne est ensuite détachée de l'appareil et sortie du bécher. Les unités structurales restées sur chacun des tamis sont placées séparément dans des capsules en porcelaine, séchées à l'étuve à 105°C et pesées. Les résultats sont exprimés en pourcentage du poids total de la prise d'essai. Pour être certain que les éléments structuraux mis en évidence par le traitement à l'alcool sont de vrais agglomérats qui ne changent pratiquement plus de forme et de taille une fois séparés les uns des autres suivant les lignes de moindre résistance par le premier tamisage, nous les avons soumis à un second traitement à l'alcool après séchage, et retamisé. Les résultats montrent effectivement (tabl. 2) que la majorité des agglomérats obtenus lors du premier tamisage se retrouvent après le deuxième.

B. — *Détermination de la stabilité des éléments structuraux*

Après avoir mis en évidence les éléments structuraux, nous avons essayé d'évaluer leur stabilité à l'eau en fonction du temps dans le but de déterminer la période au bout de laquelle la stabilisation commence. Pour cela, nous avons utilisé le test de stabilité structurale mis au point et décrit par HÉNIN et MONNIER (1956). Grâce à l'inclusion des prétraitements des échantillons à l'alcool éthylique et au benzène, ce test permet la distinction des effets de stabilisation par augmentation de la cohésion des agglomérats à l'état humide ou par diminution de leur mouillabilité due aux matières organiques. Les résultats sont donnés sous forme d'un indice S, qui varie de 0 pour les structures très stables, à des valeurs au-delà de 100 pour les structures très instables.

C. — *Étude de l'évolution de la densité apparente*

Les variations de la densité apparente sont mesurées pour apprécier une conséquence globale des changements subis par la structure initiale sous l'influence des racines. Les mesures sont effectuées à l'aide d'un voluménomètre à mercure sur des échantillons d'un volume de l'ordre de 4 à 5 cm^3.

II. — RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Les premières séries d'essais sont effectuées en vases de végétation sous serre Le matériel végétal et les sols que nous avons utilisés sont les suivants :

— le *Ray-Grass d'Italie* (variété *Rina*) (*Lolium italicum*) et la Fétuque des Prés (variété *Sequana*) (*Festuca pratensis*) ; ces graminées sont semées dans des pots en plastique à raison de 60 à 130 mg/50 cm^2 ;

— le sable fin de Fontenay (50-200 μ) représentant un milieu monoparticulaire proprement dit ;

— l'Horizon B de Versailles finement agrégé ou compacté ;

— le limon de Bernay compacté.

Le tableau suivant donne la composition granulométrique des sols expérimentés :

TABLEAU 3

Analyse granulométrique des sols utilisés

Classe de particules	Horizon B (%)	Limon Bernay (%)
Argile (< 2μ)	32,6	15,7
Limon fin (2-20μ)	24,0	24,5
Limon grossier (20-50μ)	42,2	45,1
Sable fin (50-200μ)	0,8	13,7
Sable grossier (200μ-2 mm)	0,3	0,9
Matières organiques	négligeable	négligeable

Les essais entrepris sont relativement de courte durée (ne dépassant pas 18 mois) pour éviter les complications qu'une accumulation importante de matières organiques pourrait entraîner.

Dans ce qui suit nous discuterons les résultats de l'action du système racinaire des graminées sur des sols présentant soit une structure monoparticulaire ou agrégée fine, soit une structure compacte. L'étude de l'évolution d'une structure fragmentaire grossière qui est le cas intermédiaire entre les deux structures précitées, fera l'objet d'un article ultérieur.

A. — *Action du réseau racinaire sur un milieu monoparticulaire ou agrégé fin*

1. *Milieu monoparticulaire : sable fin.*

En serre, et après 8 mois sous *Ray-Grass d'Italie* (semé à raison de 130 mg/50 cm²), la structure monoparticulaire initiale reste inchangée. A part les gaines de sable assez cohérentes formées autour des racines, il n'y avait pas de formation d'agglomérats : les quelques mottes que nous avons pu isoler se délitant instantanément en contact avec l'alcool. Nous avons remarqué en outre que la croissance du *Ray-Gras d'Italie* sur le sable fin n'a jamais été satisfaisante malgré les mesures que nous avons prises pour la faciliter. Il en résulte que la quantité de racines obtenues est très faible. Dans ces conditions, l'absence d'une structuration peut résulter de deux sortes de considérations liées aux propriétés du milieu étudié : d'une part ce dernier n'est pas, de par sa texture, comme nous le verrons plus loin, susceptible de réagir fortement à l'action des racines, d'autre part il ne semble pas favoriser le développement du système racinaire lui-même.

2. *Milieu agrégé fin : Horizon B tamisé à 0,5 mm.*

Les pots sont remplis d'Horizon B, constitué par des particules de taille inférieure à 0,5 mm, de façon qu'il n'y ait pas de tassement exagéré. La densité apparente de ce milieu est aux environs de 1,50. Au bout de 2, 4 et 6 mois sous *Ray-Grass d'Italie* (semé à 130 mg/50 cm²) l'évolution de cette structure agrégée fine est étudiée au moyen du test à l'alcool, des mesures de densité apparente et de stabilité structurale. Les résultats obtenus sont rapportés dans les tableaux 4 et 5.

On constate en premier lieu, que la structure initiale a subi un changement qui se traduit par la prise en masse des particules $< 0{,}5$ mm conduisant à la formation d'éléments structuraux de plus grandes dimensions ; toutefois, ce changement n'affecte ni la densité des mottes ni la stabilité qui conservent leur valeur initiale. On voit qu'en plus de l'action agrégeante des racines, l'Horizon B, à l'encontre du sable fin, a tendance à s'agréger spontanément. La distribution des éléments structuraux dans les pots témoins (sans herbe) 1, 3 et 5 (tabl. 4) montre en effet qu'au bout de 6 mois, 25 à 50 p. 100 des particules inférieures à 0,5 mm se sont agrégées en unités supérieures à 0,5 mm. Cet effet marqué pour la dimension des éléments formés reste toutefois très inférieur à celui obtenu sous végétation. En ce qui concerne le comportement sous l'influence du Ray-Grass, la différence la plus importante entre le sable fin et l'Horizon B agrégé fin est la présence d'argile dans le dernier. Ceci suggère que la présence d'argile soit nécessaire pour que l'action des racines se manifeste.

Si l'on représente les taux moyens de chaque catégorie d'éléments structuraux (obtenus en faisant la moyenne des pourcentages correspondants aux 3 profondeurs étudiées, rapportés dans le tableau 4) provenant des pots n° 2, 4 et 6 et de leurs

TABLEAU 4

Évolution de la structure agrégée fine de l'Horizon B sous l'action des racines du Ray-Grass d'Italie

Traitements	Pot nº 1 (2 mois sans herbe)			Pot nº 3 (4 mois sans herbe)			Pot nº 5 (6 mois sans herbe)			Pot nº 2 (2 mois ray-grass)			Pot nº 4 (4 mois ray-grass)			Pot nº 6 (6 mois ray-grass)		
Profondeur (cm)	0-6	6,0-12,5	12,5-20	0-6	6,0-12,5	12,5-20	0-6	6,0-12,5	12,5-20	0-6	6,0-12,5	12,5-20	0-6	6,0-12,5	12,5-20	0-6	6,0-12,5	12,5-20
Taille (mm)	% des éléments structuraux obtenus et leur distribution																	
> 3	10,0	11,3	32,2	1,3	4,0	7,3	10,0	2,6	14,0	48,0	18,7	34,6	36,3	56,0	86,6	40,5	36,6	60,0
3-2	3,0	1,4	4,0	2,0	2,6	6,6	5,0	5,6	4,6	1,6	2,3	2,3	4,7	2,0	0,6	3,0	2,3	1,3
2-0,5	25,5	20,8	17,3	23,4	25,3	34,6	39,3	42,6	37,3	7,0	16,7	14,8	9,3	6,0	1,2	11,7	10,0	5,3
0,5-0,2	20,5	22,7	16,0	23,6	22,3	16,6	16,6	18,0	16,0	12,6	23,5	17,3	14,3	10,0	2,0	14,7	15,6	8,6
< 0,2	41,0	43,8	30,5	49,7	45,8	34,9	29,1	31,2	28,1	30,8	38,8	31,0	35,4	26,0	9,6	30,1	35,5	24,8

TABLEAU 5

Action de racines du Ray-Grass d'Italie *sur la densité apparente et la stabilité de l'Horizon B présentant une structure agrégée fine au départ*

Traitement	Rendement (g/270 cm²)				Densité apparente				Indice S (1)			
	Nombre d'exploitation				Profondeur étudiée (cm)							
	1	2	3	Total	0-6	6-12,5	12,5-20	Moyenne	0-6	6-12,5	12,5-20	Moyenne
2 mois :												
Pot 1 (sans herbe).....	0	—	—	—	1,54	1,47	1,50	1,50	13,3	11,3	15,5	13,4
Pot 2 (ray-grass).....	36,2	—	—	36,2	1,53	1,46	1,47	1,49	11,5	9,8	15,2	12,2
4 mois :												
Pot 3 (sans herbe).....	0	—	—	—	1,55	1,52	1,49	1,52	15,0	23,0	17,4	17,4
Pot 4 (ray-grass).....	36,2	96,9	—	133,1	1,55	1,47	1,49	1,50	11,7	16,3	13,4	13,4
6 mois :												
Pot 5 (sans herbe).....	0	—	—	—	1,59	1,53	1,53	1,55	20,0	15,7	31,0	22,2
Pot 6 (ray-grass).....	28,3	72,7	79,4	180,4	1,57	1,50	1,49	1,52	16,7	18,9	26,2	20,5

(1) Nous exprimerons la stabilité par l'indice S et non, comme il est courant de le faire par $\log_{10} 10\,S$. Cette attitude est justifiée chaque fois que l'on veut comparer de petites variations de stabilité dues à l'application de traitements à un même matériau.

témoins correspondants (pots 1, 3 et 5 respectivement) sur un graphique (fig. 1), on peut voir nettement l'allure que prend l'évolution de la structure agrégée fine. Elle est caractérisée par une baisse considérable du pourcentage des éléments inférieurs à 2 mm et une augmentation correspondante du pourcentage des éléments supérieurs à 3 mm, tandis que le pourcentage de la catégorie 2-3 mm reste pratiquement inchangé. On se demande en quoi consiste cette sélectivité concernant la taille des éléments structuraux nouvellement formés. Pour répondre à cette question, nous avons essayé d'établir une relation entre la taille des éléments structuraux formés et les dimensions de la maille constituée par le réseau radiculaire.

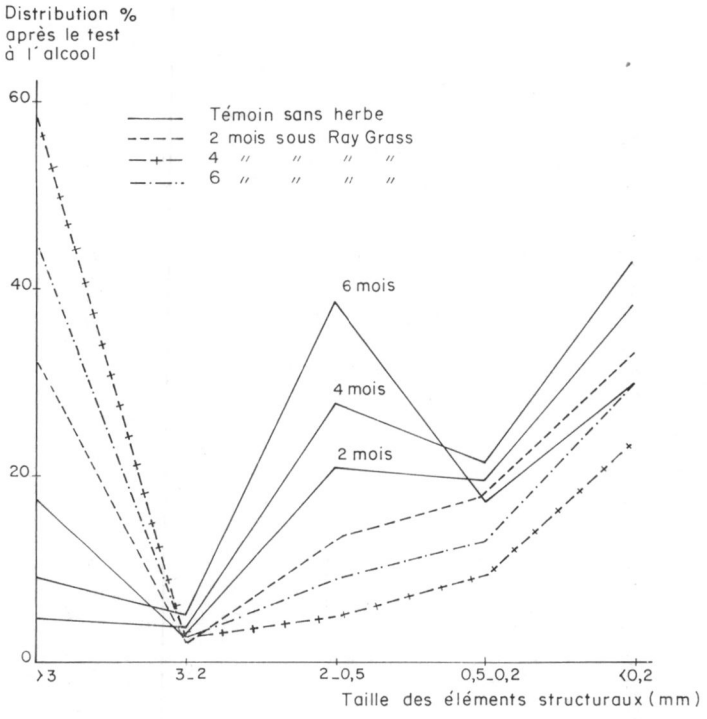


FIG. 1. — *Évolution d'une structure agrégée fine* (Horizon B de Versailles) *sous* Ray-Grass d'Italie

Pour cela nous avons déterminé, à partir des échantillons prélevés au bout de 2, 4 et 6 mois des mêmes pots d'Horizon B sous Ray-Grass, le poids total des racines contenues dans un volume de terre donné et converti ce poids en longueur de racines par la relation 1 g $\approx$ 148 m que nous avons trouvé pour le Ray Grass. Nous appelons longueur spécifique, que nous désignons par L_s, la longueur de racine par unité de volume de sol en place exprimée dans ce cas en m/cm^3. Les calculs nécessaires sont résumés dans le tableau 6. C'est cette valeur L_s que nous avons utilisée pour établir une relation entre les dimensions de la maille radiculaire et la taille prépondérante des éléments structuraux observés. Admettons qu'en général, ces unités soient plus ou moins cubiques et que 1 cm^3 de terre contienne n^3 cubes plus petits; si n est le

TABLEAU 6

Calcul de la longueur spécifique L_s du réseau radiculaire dans un milieu agrégé fin (Horizon B) *au bout de 2, 4 et 6 mois*

Profondeur (cm)	Poids de l'échantillon (g)			*d* Densité apparente			V (cm^3) Volume de l'échantillon			W (g) Poids de racines			L_t (m) Longueur totale des racines			L_s (m/cm^3) Longueur spécifique		
	Age du Ray-grass (mois)																	
	2	4	6	2	4	6	2	4	6	2	4	6	2	4	6	2	4	6
0-6.....	293,0	183,3	348,0	1,53	1,55	1,57	191,5	118,2	221,6	0,35	0,26	0,64	51,8	39,1	95,3	0,27	0,33	0,43
6-12,5	259,7	182,4	356,5	1,46	1,47	1,50	178,0	124,1	237,7	0,18	0,12	0,29	26,6	17,6	43,2	0,15	0,14	0,18
12,5-20.....	362,6	222,9	367,2	1,47	1,49	1,49	247,0	149,6	246,6	0,30	0,58	0,39	44,4	86,3	58,3	0,18	0,57	0,24
Total.....	915,3	588,6	1 071,7				618,4	392,4	705,0	0,83	0,97	1,33	122,8	143,0	196,8			
Moyenne.....				1,48	1,50	1,52										0,20	0,36	0,28

Note : $L_t = W \times 148$ (1 g racines = 148 m) ; $L_s = L_t/V$.

nombre de segments qui divisent chaque côté de ce cube, la longueur minimum L_s nécessaire pour couvrir entièrement les arêtes de ces n^3 petits cubes serait :

$$L_s = 3\ n^2\ (1)$$

Le tableau 7 obtenu à partir de l'équation précédente, donne la relation théorique entre les valeurs L_s et la taille des unités contenues dans 1 cm³ de terre.

La comparaison des valeurs L_s mesurées (tabl. 6) avec les valeurs L_s calculées (tabl. 7) montre que la taille des éléments structuraux formés au sein de l'Horizon B agrégé fin après 2, 4 et 6 mois doit se situer entre 0,30 cm et 1 cm, ce qui est effectivement le cas d'après les résultats obtenus du test à l'alcool (tabl. 4). La maille radiculaire est donc suffisamment dense pour produire des unités supérieures à 3 mm, mais pas assez pour former des unités plus petites. Ce qui explique l'absence quasi totale des unités de 2 à 3 mm et 0,5 à 2 mm si l'on ne compte pas le taux formé par autoagrégation au niveau de cette dernière catégorie.

TABLEAU 7

Calcul théorique de la taille des éléments structuraux en fonction de la longueur spécifique L_s du réseau radiculaire

Taille (cm)	Nombre de segments/cm (n)	Nombre de cubes/cm³ (n^3)	Longueur spécifique L_s (m/cm³)
1,00.....	1	1	0,03
0,50.....	2	8	0,12
0,33.....	3	27	0,27
0,25.....	4	64	0,48
0,20.....	5	125	0,75
0,10.....	10	1 000	1,08
0,05.....	20	8 000	3,63

La conception de la longueur spécifique est d'autre part utile comme indication du degré de transformation d'une structure. Comme nous avons ici une structure agrégée fine constituée par des particules initialement inférieures à 0,5 mm, et comme les unités 0,5 à 2 mm et 2-3 mm ne sont pas directement formées par le réseau radiculaire, nous pouvons considérer le taux des unités supérieures à 3 mm comme un indice du degré d'agrégation au bout d'un temps donné. Le tableau 8 montre qu'il existe une relation directe entre les valeurs L_s et le degré d'agrégation, c'est-à-dire que, dans la période étudiée, l'intensité d'agrégation croît en fonction des valeurs croissantes de L_s. Le poids rapporté sur le tableau 8 représente la moyenne des poids d'éléments > 3 mm obtenus aux 3 profondeurs étudiées et le degré d'agrégation

(1) En effet, pour chaque petit cube d'arête $\frac{1}{n}$ la longueur nécessaire, compte tenu du fait que chaque arête est commune à 4 cubes, est égale à $\frac{12}{n} \times \frac{1}{4} = \frac{3}{n}$. La valeur de L_s correspondante est donc :

$$\frac{3}{n} \times n^3 = 3\ n^2$$

correspondant est calculé en divisant ce poids moyen par le poids total de la prise d'essai (15 g). Le tableau indique aussi une relation entre les valeurs L_s et la taille prépondérante des éléments structuraux conformément à ce qui est signalé plus haut.

TABLEAU 8

Relation entre la longueur spécifique L_s, la taille des éléments structuraux et le degré d'agrégation d'une structure agrégée fine (Horizon B)

Moyenne des 3 profondeurs étudiées

Période sous ray-grass (mois)	Poids (g) des unités > 3 mm	Degré d'agrégation (%)	Taille spécifique des unités (mm)	L_s m/cm³
2	4,8	32,0	3-5	0,20
4	9,1	60,7	2,5-3,3	0,36
6	6,6	44,0	3,3	0,28

Il apparaît que l'intensité d'agrégation dépend en grande partie de la quantité effective des racines présentes dans le sol à un moment donné.

3. *Milieu agrégé fin : sol en place des cases lysimétriques.*

Comme le cas de l'Horizon B en vase de végétation, l'Horizon B dans les cases lysimétriques donne des résultats tout à fait dans le même sens. L'évolution de la structure agrégée fine au départ s'est aussi manifestée par une augmentation des unités supérieures à 3 mm, mais d'une manière plus lente. En plus, le phénomène d'auto-agrégation à ce niveau dans le témoin sans herbe devient appréciable avec le temps. Le tableau 9 montre la distribution des éléments structuraux de l'Horizon B à structure fine au bout de 4 ans sous Fétuque élevée en comparaison avec celle continuellement en jachère nue.

TABLEAU 9

Évolution de la structure agrégée fine de l'Horizon B dans les cases lysimétriques

Taille des unités (mm)	Case 17 (9 ans en jachère)	Case 18 (4 ans sous fétuque) élevée
	P. 100 distribution des éléments structuraux	
> 3	50,6	89,3
3-2	5,3	2,0
2-0,5	27,3	4,6
0,5-0,2	6,6	1,3
< 0,2	10,2	2,8

De tout ce qui précède, il apparaît donc que sur une structure agrégée fine l'action des racines se traduit par une agrégation des particules en unités plus grandes dont la taille spécifique est déterminée par les dimensions effectives de la maille radiculaire. Il apparaît aussi que cette action agrégeante dépend dans ces conditions

de la texture du sol et notamment de sa teneur en argile. On conçoit, dans ces conditions, qu'aucune évolution ne soit perceptible à partir d'une structure monoparticulaire dépourvue d'argile.

B. — *Action du réseau racinaire sur un milieu continu*

1. *Milieu fabriqué: Limon Bernay et Horizon B « compactés ».*

Dans cet essai en serre, nous avons semé la Fétuque des Prés et le *Ray-Grass d'Italie* (semé à 60 mg/50 cm²) sur le Limon Bernay et l'Horizon B préalablement malaxés et compactés en une masse continue. Leur densité apparente après ce traitement est de l'ordre de 1,60 et 1,80 respectivement. Dans un premier temps, les deux graminées s'établissent très lentement, puis la Fétuque meurt, mais le Ray-Grass a survécu. La Fétuque se trouve ainsi éliminée dans les autres essais qui suivent, et le Ray-Grass est le seul à être utilisé.

TABLEAU 10

Évolution de la structure continue initiale du Limon Bernay (A_0, A_2) *et de l'Horizon B* (B_0, B_1) *sous l'action des racines du* Ray-Grass d'Italie

Taille des éléments structuraux (mm)	Traitement, profondeur (cm) et p. 100 d'éléments structuraux											
	B_0 (sans herbe)			B_1 (ray-grass)			A_0 (sans herbe)			A_2 (ray-grass)		
	0-4	4-8	8-12	0-4	4-8	8-12	0-4	4-8	8-12	0-4	4-8	8-12
> 3	86,5	88,0	86,6	54,0	82,6	84,0	98,0	98,0	96,0	95,0	98,0	97,0
3-2.....	2,1	3,3	3,3	2,8	2,7	5,7	—	—	—	—	—	0,6
2-0,5	2,8	3,3	3,3	12,1	6,7	4,1	—	—	—	0,3	0,1	0,3
0,5-0,2	0,7	0,7	0,7	12,7	2,7	1,0	—	—	—	—	—	—
< 0,2.....	7,9	4,7	6,1	18,4	5,3	5,2	—	—	—	—	—	—

TABLEAU 11

Évolution de la densité apparente et de la stabilité structurale du Limon Bernay (A_0, A_2) *et de l'Horizon B* (B_0, B_1) *compactés, sous l'action des racines du* Ray-Grass d'Italie

Traitements	Rendement g/pot (50 cm²)	Densité apparente				Indice S			
		Profondeur étudiée (cm)							
		0-4	4-8	8-12	Moyenne	0-4	4-8	8-12	Moyenne
Sans herbe (A_0)	—	1,65	1,62	1,62	1,63	31,0	32,4	25,4	29,6
Ray-grass (A_2)	8,1	1,52	1,63	1,63	—	10,3	25,8	34,5	23,6
Sans herbe (B_0)	—	1,81	1,79	1,80	1,80	53,5	80,4	93,0	75,6
Ray-grass (B_1)	11,2	1,53	1,49	1,82	—	23,0	53,4	61,8	46,0

Après 6 mois, le test à l'alcool montre qu'une nouvelle structure de l'Horizon B est formée, tandis que la structure continue au départ du Limon Bernay reste sensi-

blement la même (tabl. 10). Le changement de la structure initiale de l'Horizon B est caractérisé par une augmentation du taux des agglomérats plus petits que 2 mm aux dépens de celui des unités plus grandes que 3 mm, par une baisse appréciable de la densité apparente de 1,80 à 1,50 jusqu'à une profondeur de 8 cm et par une diminution sensible de la valeur de l'indice S, c'est-à-dire une augmentation de la stabilité des éléments structuraux (tabl. 11).

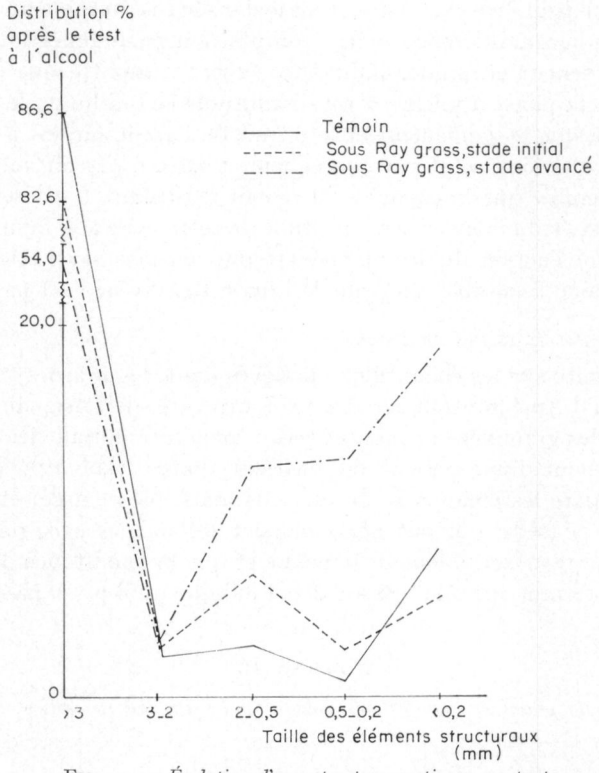


FIG. 2. — *Évolution d'une structure continue, compacte* (Horizon B de Versailles) *sous* Ray-Grass d'Italie

Si l'on représente sur un graphique la distribution des éléments structuraux du témoin B_0 et celle qui correspond à la profondeur 0-4 cm par exemple (tabl. 10), et la distribution de B_1 à des profondeurs de 0-4 cm et 4-8 cm, les courbes qui en résultent ont l'allure indiquée dans la figure 2. On voit que la formation de la nouvelle structure s'effectue par une division de la masse compacte par le réseau radiculaire. Cette division est accompagnée d'un affinement progressif des unités plus grandes que 3 mm vers les fractions 0,5 à 2 mm puis vers les fractions plus fines encore à mesure que le réseau radiculaire devient plus dense. Par ailleurs, la baisse de la densité apparente de 1,80 à 1,50, à la suite de ces changements, entraîne une augmentation correspondante de la porosité de 31,4 p. 100 à 43 p. 100. D'autre part, l'augmentation de la stabilité structurale est montrée par le tamisage des échantillons prétraités au benzène comme due à une baisse de la mouillabilité des unités structurales causée par les matières organiques qui, dans ce cas, sont vraisemblablement des racines mortes en décomposition.

En ce qui concerne le Limon Bernay, il n'y a pas de division poussée de la masse compacte par les racines (tabl. 10) et les changements de densité apparente et de stabilité sont, par conséquent, beaucoup moins prononcés et sont surtout limités à la profondeur 0-4 cm (tabl. 11).

Étant donné les conditions expérimentales identiques sous lesquelles le Limon Bernay et l'Horizon B ont été soumis, la différence de leur comportement sous l'action des racines ne peut être expliquée, comme dans le cas du sable fin et de l'Horizon B agrégé fin, que par la différence de leur composition granulométrique ou plus exactement, de leur teneur en argile. KHEYRABI (1966) a montré que dans un milieu pauvre en argile, la phase argileuse y est discontinue ce qui limite les possibilités de fissuration, parce que le gonflement et le retrait de l'argile qui est à l'origine de la fissuration n'est que localisé et par conséquent, n'affecte pas un volume important de terre. Or, il semble que la capacité du réseau radiculaire à diviser une masse de terre compacte est étroitement liée à l'aptitude de cette terre à se fissurer. C'est ce qui explique pourquoi l'action du Ray-Grass est plus efficace sur l'Horizon B qui est riche en argile, donc fissurable alors que le Limon Bernay ne l'est pas.

2. *Milieu naturel : sols riches en limon.*

Une étude faite sur les échantillons prélevés dans des prairies temporaires établies à la Station d'Amélioration des Plantes fourragères de Lusignan a montré aussi que la présence des graminées ne modifie pas la structure initiale des sols pauvres en argile même au bout d'une période de quelques années (tabl. 12).

Si l'on compare les champs K (3 ans sous maïs, blé et orge) et L (3 ans sous fétuque hybride + trèfle) qui ont pratiquement les mêmes sols, on voit que leur densité apparente reste sensiblement la même et que la persistance de la quasi-totalité des unités 5-10 mm après le test à l'alcool indique qu'il n'y a pas de division par les racines.

TABLEAU 12

Action des graminées sur les sols pauvres en argile dans le milieu naturel

Profondeur étudiée (cm)	K 3 ans Cultures annuelles		L 3 ans Fétuque + Trèfle		E 3 ans Dactyle	
	Densité apparente	Indice S	Densité apparente	Indice S	Densité apparente	Indice S
0-6	1,71	3,10	1,63	1,18	1,70	1,36
6-12	1,72	2,70	1,71	2,07	1,75	1,53
12-24	1,71	2,28	1,66	2,04	1,73	1,44
0-24	1,71	2,69	1,66	1,76	1,72	1,44
Argile (%)	13,4		13,4		16,5	
Limon (%) (2-50μ)	69,6		70,0		66,5	
P. 100 éléments structuraux (5-10 mm)	97,0		97,3		97,0	

C. — *Mécanismes de la formation des éléments structuraux*

Il découle des expériences précédentes que la texture du sol régit plus ou moins directement l'action des racines et que là où la texture est favorable, cette action se traduit par une division ou un affinement de la structure s'il s'agit d'un sol compact ou par une agrégation des particules isolées en unités plus grosses, si le sol au départ est monoparticulaire.

Nous nous proposons maintenant de mettre en évidence les mécanismes qui entrent en jeu dans les processus de division et d'agrégation en opérant à partir des modèles physiques que nous avons fabriqués au laboratoire.

1. *Hypothèse de la pression exercée par les racines.*

Cette hypothèse met l'accent sur l'action physique des racines et, pour la reproduire, nous avons utilisé des fils de fer galvanisés en guise de racines. L'Horizon B agrégé fin (tamisé à 0,5 mm) contenu dans un petit pot rigide et amené à la capacité au champ, la quantité d'eau nécessaire étant apportée par capillarité, est le milieu dans lequel nous avons planté ces fils de fer (diamètre 0,5 mm) à une densité de 100 fils/40 cm². Les modèles sont laissés sécher à l'air puis les fils sont retirés avec précaution. A partir du gâteau troué (A) qui résulte de ce traitement et du gâteau témoin non troué (T), nous avons obtenu par fragmentation mécanique des unités de 5 à 10 mm que nous avons soumis au test à l'alcool. Les résultats du test (tabl. 13) montrent que l'introduction des fils a effectivement causé une agrégation des par-

TABLEAU 13

Effet de l'introduction des fils de fer dans un milieu agrégé fin (Horizon B)

Taille des éléments structuraux (mm)	P. 100 distribution des éléments structuraux	
	Éléments témoins sans canaux (T)	Éléments avec canaux laissés par les fils (A)
> 3	14,0	31,3
3-2	4,6	4,0
2-0,5	37,3	23,3
0,5-0,2	16,0	15,3
< 0,2	38,1	26,1

ticules inférieures à 2 mm en unités supérieures à 3 mm, le taux de ces dernières étant nettement supérieur pour le groupe A que pour le groupe T.

Cette agrégation supplémentaire peut provenir du tassement de la terre humide lors de l'entrée des fils, et (ou) des perturbations liées à la présence des fils lors de la diminution du volume du gâteau causé par le retrait de l'argile quand l'échantillon est mis à sécher. Il y a quelque raison de croire que l'agrégation provient non seulement de la pression locale due à l'introduction des fils mais encore et surtout des

perturbations causées par leur présence puisque le tassement ne diminue que de moins de 1 p. 100 la porosité totale (42,5 p. 100) du volume de terre étudié (200 cm^3), le volume total des fils étant de 0,4 cm^3. Cette diminution de porosité est trop faible, même si elle est localisée au niveau des fils, pour justifier à elle seule l'importante agrégation observée dans le tableau 13. L'existence d'une telle agrégation sous l'influence d'un réseau de fils de fer indique d'autre part le caractère mécanique du processus. Reste à savoir si le déroulement de celui-ci dépend aussi de la texture du sol comme c'est le cas des essais en vases de végétation et dans le milieu naturel. Cet aspect du problème sera discuté dans un article ultérieur.

2. *Hypothèse des alternances d'humectation et de dessiccation.*

a) *Effet de la densité des fils et du nombre de cycles d'humectation et de dessiccation.*

Les essais que nous avons faits avec des fils de nylon (diamètre 0,32 mm) plantés dans des gâteaux (6 cm de diamètre et 2 cm d'épaisseur) d'Horizon B compacté ont montré (tabl. 14) que les fragmentations ne se produisent qu'après deux cycles d'humectation et de dessication et que, dans ce cas, elles augmentent avec la densité d'implantation des fils présents dans les gâteaux.

TABLEAU 14

Résultat du test à l'alcool sur les gâteaux compacts d'Horizon B dans lesquels sont implantés les fils de nylon

Taille des éléments structuraux (mm)	P. 100 distribution des éléments structuraux					
	Nombre de cycles d'humectation et de dessication					
	1 cycle			2 cycles		
	0 fils	200 fils	300 fils	0 fils	200 fils	300 fils
> 3.....	100	100	100	12,3	8,1	2,2
3-2	—	—	—	8,1	4,7	2,4
2-0,5	—	—	—	33,8	41,7	48,5
0,5-0,2	—	—	—	3,2	2,9	3,2

Les résultats précédents sont obtenus sur des gâteaux fabriqués à partir d'une pâte d'Horizon B drainée sur Büchner. La dessication se fait par séchage à l'air et la réhumectation après chaque cycle, par capillarité en posant les gâteaux sur une couche de sable fin mouillé par en dessous.

b) *Effet des autres facteurs.*

Nous avons aussi remarqué que, pour un nombre de cycles donné d'humectation et de dessication, l'intensité de fragmentation dans les gâteaux varie avec leur humidité de préparation, les conditions de drainage et la température de dessication. On voit dans le tableau 15, que pour deux cyles d'humectation et de dessication et avec

des fils de fer galvanisés de 1 mm de diamètre, la fragmentation est plus intense si les gâteaux sont séchés à l'air plutôt qu'à 105°C, si les gâteaux sont fabriqués à partir d'une pâte contenant un excès d'eau qui est ressuyée par un drainage rapide que s'ils sont fabriqués à 26 p. 100 d'humidité (correspondant à la capacité au champ de l'Horizon B) sans drainage. Remarquons de plus que l'influence considérable de l'humidité de malaxage d'une terre sur sa fragmentation ultérieure a été mise en évidence par HÉNIN (1938). Les résultats obtenus par cet auteur montrent également que le maximum d'agrégation est obtenu par malaxage à une humidité voisine de la capacité au champ.

TABLEAU 15

Facteurs déterminant l'intensité de fragmentation d'un gâteau de terre compacte (Horizon B)

Taille des éléments structuraux (mm)	P. 100 distribution des éléments structuraux						
	40 p. 100 humidité drainage Büchner				26 p. 100 humidité sans drainage		
	Densité de fils/gâteau (20 cm²)						
	0 (air)	0 (105°C)	30	60	0	30	60
> 3	12,3	32,0	25,0	7,7	78,0	62,4	45,4
3-2	8,1	3,2	7,1	4,9	3,8	7,7	11,8
2-0,5	33,8	17,0	20,0	32,0	10,3	20,0	32,3
0,5-0,2	3,2	2,4	1,8	3,7	1,4	2,1	2,3
< 0,2	43,6	45,4	46,1	51,7	6,5	7,8	8,2

Note : Excepté pour la colonne 0 (air) qui désigne la dessication par sèchage à l'air, la dessication dans les autres gâteaux se fait à 105°C comme le cas de 0 (105°C).

c) *Rapprochement des résultats obtenus sur modèles et en serre.*

Nous avons constaté que, comme dans le cas du Ray-Grass sur l'Horizon B compacté en serre, la présence des fils de nylon ou de fer galvanisé entraîne la fragmentation de la masse de terre compacte, et que la distribution des éléments structuraux qui en résulte présente les mêmes caractéristiques. C'est dire que sur les modèles, la fragmentation est aussi caractérisée par un affinement des éléments structuraux supérieurs à 3 mm vers les dimensions plus petites (inférieures à 2 mm) et par une bonne relation entre le degré d'affinement des unités formées et la densité des fils. Pour élucider ce dernier point, nous avons récupéré les fractions supérieures à 3 mm après le test à l'alcool dont le taux est rapporté dans le tableau 15 et nous leur avons fait subir un tamisage à sec qui donne une distribution des unités supérieures suivantes : voir tabl. 16.

On voit que, dans le témoin, la fraction > 10 mm est prédominante et qu'elle tend vers la taille 3-5 mm à mesure que le nombre des fils croît vers 60. En effet, la

TABLEAU 16

Distribution des éléments structuraux supérieurs à 3 mm en fonction de la densité des fils de fer implantés dans un gâteau de terre compacte (Horizon B)

Taille des éléments structuraux (mm)	P. 100 distribution					
	40 p. 100 humidité drainage Büchner			26 p. 100 humidité sans drainage		
	Densité de fils/gâteau (20 cm²)					
	0	30	60	0	30	60
> 10	58,0	0	0	68,3	25,6	0
10-5	21,0	45,0	10,4	12,3	40,9	43,3
5-3	11,2	41,5	68,8	9,0	25,6	42,4

prédominance des unités 5-10 mm pour une densité de 30 fils/gâteau et celles de 3-5 mm pour 60 fils/gâteau correspond bien au fait que si l'on divise mécaniquement un gâteau de 20 cm² par 30 et 60 fils, on obtiendrait respectivement, des unités qui sont essentiellement 5-10 mm et 3-5 mm. L'allure que prennent les courbes (fig. 3 représentant la distribution des éléments structuraux est d'ailleurs tout à fait semblable à celle de la figure 2.

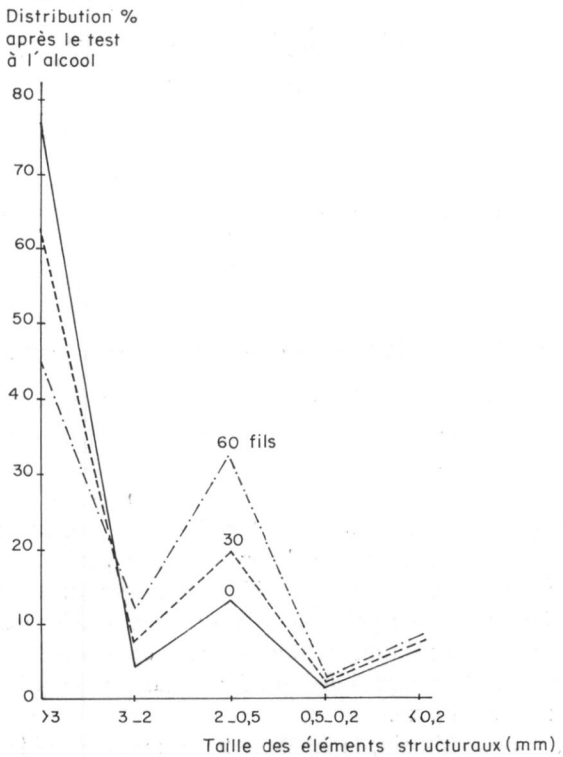


FIG. 3. — *Fragmentation d'une structure continue, compacte* (Horizon B) *en fonction de la densité des fils de fer galvanisés*

3. *Hypothèse des humectations et dessiccations différentielles.*

Dans les deux hypothèses précédentes, nous avons concentré notre effort sur la démonstration de l'effet mécanique causé par la simple présence de fils inertes dans un sol texturalement agrégeable et fissurable. Or, le réseau racinaire est un système dynamique et, par conséquent, il y a raison de croire que par leurs activités biologiques les racines agissent sur le milieu, notamment sur son régime hydrique. Cette action est conçue comme résultant d'une humectation et d'une dessiccation plus poussées dans les régions au voisinage immédiat des racines que dans celles qui se trouvent plus loin, d'où le terme différentiel utilisé. Dans un premier temps, nous avons construit des modèles avec de l'Horizon B compacté sur lesquels nous avons essayé d'effectuer une dessiccation différentielle en chauffant par un bec Bunsen les bouts libres des fils de fer implantés dans le gâteau. En comparant les résultats du test à l'alcool sur les gâteaux ainsi traités avec ceux des gâteaux témoins sans fils, non chauffés, des gâteaux avec le même nombre de fils, mais non chauffés, et des gâteaux avec le même nombre de fils chauffés indirectement par rayonnement de la chaleur provenant du bec Bunsen, nous avons pu isoler l'effet de chaque traitement dans le processus de fragmentation du gâteau.

Nous pouvons voir dans le tableau 17, que la fragmentation la plus intense correspond au traitement des fils chauffés directement, autrement dit, à la dessiccation différentielle subie par le gâteau.

TABLEAU 17

Effet de la dessiccation différentielle sur l'Horizon B compacté

Taille des éléments structuraux (mm)	Traitements et p. 100 distribution des éléments après le test à l'alcool							
	30 fils (dia. 1 mm)/gâteau				60 fils (dia. 0,5 mm)/gâteau			
	Témoin (sans fils)	Fils non chauffés	Fils indirectement chauffés	Fils directement chauffés	Témoin (sans fils)	Fils non chauffés	Fils indirectement chauffés	Fils directement chauffés
> 3	75,5	62,4	57,8	46,5	70,4	67,6	57,8	43,1
3-2	4,0	7,7	7,7	8,6	4,4	7,8	9,4	9,4
2-0,5.....	12,3	20,1	24,7	32,7	16,1	16,5	23,7	35,4
0,5-0,2.....	1,6	2,1	2,1	3,6	2,0	1,4	2,0	3,4
< 0,2	6,4	7,7	7,7	8,6	7,1	6,7	7,1	8,7

L'humectation différentielle, qui nécessite un dispositif plus compliqué, sera incessamment étudiée et fera l'objet d'une publication prochaine ainsi que l'étude de l'humectation et de la dessiccation différentielles sur un sol riche en limon difficilement fissurable ou agrégeable.

Remarquons dès maintenant que les modèles ne peuvent pas représenter exactement le milieu sol-racines et que par conséquent, les résultats obtenus ne peuvent être qu'une grossière approximation de ce qui se passe réellement. Dans notre cas, c'est la convergence des résultats avec les faits observés en serre qui justifie leur emploi.

Ils nous sont d'autant plus indispensables qu'ils nous permettent d'isoler les mécanismes qui sont opérationnels dans le processus global de la formation de la structure sous prairie.

CONCLUSIONS

Étant donné la complexité que présentent *a priori* les mécanismes de la granulation du sol sous prairie et le peu d'informations disponibles à cet égard, il nous a paru préférable dans un premier temps, de recenser les différents types d'action susceptibles de se manifester.

Un tel parti a évidemment pour conséquence que les faits sont établis davantage par la convergence de résultats expérimentaux obtenus dans des conditions différentes que par l'étude statistique des données ; une telle étude aurait nécessité des conditions expérimentales hors de notre portée, compte tenu du souci que nous avions d'envisager des aspects très divers du phénomène.

Ceci étant, il est cependant possible de tirer de cette étude un certain nombre d'indications importantes. Tout d'abord, contrairement à l'opinion très répandue qu'il suffit de mettre un sol à structure défavorable sous prairie pour que son état soit sensiblement amélioré, il ressort que *pendant la période relativement courte qui suit l'établissement d'une prairie de graminées* (1), l'efficacité des racines à cet égard dépend non seulement de l'espèce des graminées, mais aussi et surtout de la composition granulométrique des sols et de leur état physique initial. Nous avons vu en effet que la Fétuque des Prés se montre nettement moins efficace que le *Ray-Grass d'Italie*. De même l'effet observé est beaucoup plus marqué dans les sols qui manifestent un certain caractère argileux que dans les terres riches en limons ou en sables fins. Enfin, lorsqu'elle existe, cette action est conditionnée par l'état structural initial. La granulation s'effectue en effet soit par agrégation de particules isolées ou d'éléments structuraux de petites tailles en unités de plus grande dimension, soit par fragmentation des mottes ou de la masse du sol en unités plus petites selon que la structure initiale est pulvérulente ou bien grossière ou continue. Dans les deux cas, le phénomène se traduit par un resserrement de la distribution dimensionnelle des éléments structuraux autour d'une taille moyenne dont les dimensions semblent déterminées par celle de la maille racinaire dans la couche de sol considérée.

Il est à noter, d'un point de vue plus général, que l'action des racines semble se borner à révéler, à accélérer, ou à fortement accentuer une évolution structurale essentiellement conditionnée par la texture du sol. Nous avons vu en effet que si un sol n'est, par ses propriétés, pas fissurable, c'est-à-dire s'il ne se prête pas au gonflement et au retrait suivant son état hydrique, l'action des racines s'avère insignifiante.

L'examen des mécanismes responsables de la formation des éléments structuraux par agrégation ou fragmentation éclaire cette proposition. Nous avons vu en effet que les racines pouvaient agir de deux façons différentes :

— en premier lieu, leur seule présence crée dans le système une hétérogénéité qui suffit à entraîner, selon les cas, une agrégation ou une fissuration, mais toujours par

(1) Notons que la période en question est de l'ordre de grandeur de la durée de végétation d'un engrais vert d'hiver en sol de verger par exemple.

l'intermédiaire d'une perturbation dans le développement des phénomènes de gonflement ou de retrait ; — d'autre part, à cette action mécanique s'ajoute l'effet résultant de la dessiccation préférentielle, qui nécessite lui aussi une possibilité de réaction du sol aux alternances d'humectation et de dessiccation.

D'ores et déjà, ces données contribuent à expliquer de nombreuses observations faites dans le milieu naturel. Elles suggèrent de plus que le choix judicieux de la ou des graminées utilisées, la présence de certaines qualités texturales ou d'un certain état physique initial sont des conditions indispensables à l'amélioration rapide de la structure d'un sol sous prairie.

De plus, comme cette amélioration dépend largement de la quantité de racines présentes, les mesures tendant à faciliter leur développement et prolifération telles qu'une fertilisation équilibrée, une exploitation judicieuse de la partie aérienne, et un drainage adéquat sont évidemment nécessaires.

Reçu pour publication en juin 1968.

SUMMARY

DYNAMICS OF SOIL GRANULATION IN GRASSLAND

The object of this study is to assess the part played by the roots of forage grasses in the formation of soil structure within a relatively short period of meadow establishment not exceeding 18 months.

The experiments were performed with potted plants in the greenhouse and with physical models simulating the root/soil system. The plant material tested included two grasses, *Lolium italicum* and *Festuca pratensis*, sown in different soil media (fine sand, soils rich in silt or in clay) at various physical states (single-grained, finely-aggregated or compacted). The physical models were made up from a clay-rich soil (Horizon B of Versailles), either compacted or not, in which either nylon or zinc wires were embedded. These models were so processed as to reproduce the effects observed from experiments with potted plants in the greenhouse.

The results show that soil texture is apparently the major factor in soil structure formation, the clay-rich soils being found more suitable for structuration than those high in silt or in sand content. The action of the roots *per se* seems to limit itself in revealing a latent structural condition controlled beforehand by the soil texture. The results show in addition that short-term soil structuration depends also on the grass *species* involved. In this study, *Lolium italicum* was more efficient than *Festuca pratensis*.

With regards to the soil structure formation mechanisms, two distinct processes were observed depending on the *initial physical condition* of the soils. Thus granulation occurs either through fragmentation of the soil mass into smaller units, or through aggregation of smaller units into larger elements, depending on whether the soil was originally compact or loose. In both processes, the roots apparently act in two different ways : to begin with, the heterogeneity they bring into the environment could already initiate granulation but this action was on the other hand accentuated by the disturbances brought about by the preferential wetting and drying of the soil in the vicinity of the root system.

Lastly, the average size of the structural elements, obtained either through fragmentation or aggregation, is in good relation with the root density in the soil layer studied.

ZUSAMMENFASSUNG

DYNAMIK DER GRANULIERUNG DES BODENS UNTER KUNSTWIESE

Das Ziel dieser Arbeit besteht darin, die Rolle der Futtergräserwurzeln bei der Bildung der Bodenstruktur während einer verhältnismässig kurzen Periode von Wiesenaufbau, die 18 Monate nicht übersteigt, zu untersuchen.

Die Versuche wurden in angetöpften Pflanzen im Gewächshaus und auf Mustern, die das Wurzel-Boden-System nachahmen, durchgeführt. Die Versuche mit dem Pflanzenmaterial beziehen sich

auf zwei in verschiedenem Milieu (Feinsand, lehmhaltiger Boden, tonhaltiger Boden) gesäte Gräser : *Lolium italicum* und *Festuca pratensis*, die am Anfang ebenfalls verschiedene physikalische Zustände (Einteilchenzustand, feine oder kompakte Zusammensetzung) aufwiesen. Die physikalischen Muster werden mittels eines kompakten oder nicht kompakten tonhaltigen Bodens (Horizont B aus Versailles) hergestellt, in welchem entweder Nylondrähte oder Eisendrähte eingebaut sind. Diese Muster werden Behandlungen ausgesetzt, um die bei den getöpften Pflanzen beobachteten Wirkungen zu reproduzieren.

An Hand der erhaltenen Ergebnisse scheint es, dass die *Bodenstruktur* das Hauptelement bei der Strukturbildung ist, wobei sich die tonreichen Böden als wesentlich günstiger für die Bildung der Struktur erweisen als die lehm-oder sandreichen Böden. Es scheint, dass die eigentliche Wirkung der Wurzeln sich darauf beschränkt, einen latenten strukturellen Zustand zu offenbaren, der im voraus durch die Bodentextur gegeben ist. Ausserdem zeigen die Ergebnisse, dass die kurzfristige Strukturbildung auch von der *Gräsersorte* abhängig ist. In dieser Untersuchung zeigt sich *Lolium italicum* wirksamer als *Festuca pratensis*.

Was die Vorgänge der Strukturbildung, da wo sie sich schätzen lässt, anbetrifft, so werden zwei verschiedene Verfahren im Verhältnis zum *anfänglichen physikalischen Zustand* des Bodens untersucht. In der Tat vollzieht sich die Granulierung entweder durch Zersplitterung der Bodenmasse in kleinere Teichen oder durch Zusammensetzung mehr oder weniger zahlreicher kleiner Teilchen zu grösseren Elementen je nach dem anfänglichen Zustand des Bodens : kompakt oder pulverförmig. In diesen zwei Verfahren scheinen die Wurzeln auf zwei verschiedenen Arten zu wirken : zunächst ruft die durch die Wurzeln in dem Milieu geschaffene Heterogeneität für sich allein die Veränderungen, welche vorzugsweise durch Befeuchtung und Trocknung in dem angrenzenden Boden hervorrufen, verstärkt wurden.

Schliesslich steht die mittlere Grösse der durch Zerplitterung sowie durch Zusammensetzung gebildeten Strukturelemente in guter Uebereinstimmung mit der Dichte der Wurzeln in der betrachteten Bodenschicht.

РЕЗЮМЕ

Динамика гранулирования почв под временными лугами.

БЮИ-ХЬЮ-ТРИ.

Данная работа ставит целью изучение роли корневой системы кормовых злаков в образовании структуры почв в течении относительно короткого периода существования искуственного луга, не превышающего 18 месяцев.

Автор провел серию опытов в вегетационных вазах и с физическими моделями, представляющими систему корни — почва. В опытах с растительным материалом были испытаны следующие злаки : райграс итальянский (*Lolium italicum*) и овсяница луговая (*Festuca pratensis*), посеянные на разной среде (мелкий песок, илистая почва, глинистая почва), находившейся в начале опыта в различном физическом состоянии (монопартикулы, мелкие, или компактные агрегаты). Физические модели были приготовлены на базе уплотненной или неуплотненной глинистой почвы (горизонт В Версаля), в которую были введены нилоновые или проволочные нити. Модели эти подвергались обработкам, чтобы получить эффекты наблюдавшиеся в опытах с вегетационными сосудами.

Полученные результаты указывают, что так-как механический состав почвы должен, по всей вероятности, являться главным элементом образования структуры, то глинистые почвы представляют гораздо более благоприятные условия для ее образования, чем почвы илистые, или песчаные. Что-же касается непосредственного действия корневой системы, ее роль как-будто органичивается проявлением скрытого состояния структуры, управляемой ранее механическим составом почвы. Результаты эти показы-

вают также, что быстрое образование структуры зависит и от вида злака. В данной работе итальянский райграс дал результаты более эффективные, чем овсяница луговая.

В местах где оценка механизма образования структуры была возможна, наблюдалось два различных процесса, в зависимости от начального состояния изучаемой почвы. И действительно, гранулирование происходит при помощи или раздробления почвенной массы на более мелкие единицы, или сплочения более или менее мелких единиц в элементы более крупных размеров, в зависимости от того было-ли начальное состояние почвы плотным или рассыпчатым. В течении обоих процессов корневая система должна действовать двумя способами : сперва, гетерогенность вызванная корнями в среде вызывает сама по себе начало гранулирования; затем действие это дополняется пертурбациями вызванными предпочтительными увлажнением или высыханием почвы по соседству с корнями.

И наконец, средние размеры элементов структуры образовавшихся с помощью раздробления или сплочения зависят от густоты корневой системы в рассматриваемом слое почвы.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

CONCARET J., 1965. *Étude des mécanismes de la destruction des agrégats de terre au contact de solutions aqueuses.* Thèse Fac. des Sci. Univ. de Strasbourg.

DEMOLON 1952. *Dynamique du sol. Principes d'agronomie.* Tome I, 5e éd., Dunod, Paris.

DONAHUE R. L., 1958. *Nature des sols et croissance végétale.* Intercontinental Editions, Inc. N. Y.

FEODOROFF A., 1960. Évaluation de la stabilité structurale d'un sol. (Indice S). Nouvelles normes d'emploi pour l'appareil à tamiser. *Ann. agron.*, **6**, 651-59.

HARRIS R. F., et *al.*, 1966. Dynamics of soil aggregation. *Adv. Agron.* **18**, 471-478.

HENIN S., 1938. *Étude physico-chimique de la stabilité structurale des terres.* Thèse. Univ. de Paris.

HENIN S., MONNIER G., 1956. Évaluation de la stabilité de la structure du sol. *Proc. 6th internation. Sci. Congr.* Vol. B, 49-52.

KHEYRABI D., 1966. *Influence de la composition granulométrique des sols sur leur stabilité structurale.* Thèse Univ. de Paris.

KOEPF H., 1961. Contribution à la formation de la structure chez divers types de sols. *Landw. Forsch.* **14** (1), 1-9.

LAW J. P. Jr, KUNZE G. W., 1966. Reactions of surfactants with montmorillonite. Adsorption mechanisms. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **30** (3), 321-327.

MARTIN J. P., et *al.*, 1955. Soil aggregation. *Adv. Agron.*, **7**, 1-37.

MONNIER G., 1965. *Action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols.* Thèse Univ. de Paris

RUSSELL E. W., 1938. Soil structure. *Tech. Comm. nº 37, Imp. Bureau Soil Sci., Harpenden.*

Ann. agron., 1968, **19** (4), 441-455.

CONTRIBUTION A LA CONNAISSANCE AGRO-PÉDOLOGIQUE DES SOLS LOURDS DE LORRAINE

H. METTAUER

Station d'Agronomie,
Centre de Recherches agronomiques d'Alsace, 68 - Colmar
Institut national de la Recherche agronomique

SOMMAIRE

Une étude pédologique et agronomique a été entreprise en Moselle dans la région de Château-Salins. Une cinquantaine de profils furent décrits et analysés en portant une attention particulière à la structure des sols en place et à l'importance des systèmes racinaires.

Les types de sols rencontrés procèdent de roches-mères du Trias et du Lias essentiellement marneux, de limons de couverture et d'alluvions. Profondément influencés par la nature du substratum géologique, ces sols présentent une pédogénèse très ancienne et leurs caractères pédologiques sont davantage fonction de leur histoire que du climat et de la végétation actuels.

Les conditions hydriques sont assez défavorables, le drainage souvent insuffisant et les phénomènes d'hydromorphie fréquents. L'exploitation agricole de ces sols pose des problèmes de drainage et d'amélioration de la structure. Des solutions ont été proposées en vue de l'ameublissement des sols argileux et de la restructuration des limons battants. Des expériences de drainage-taupe et de sous-solage vont être tentées en relation avec la mise en place de prairies temporaires.

INTRODUCTION : CLIMAT — GÉOLOGIE — CARACTÈRES GÉNÉRAUX DES SOLS

De par sa situation géographique qui le place à la partie nord-est du Grand Plateau lorrain, le département de la Moselle ne forme pas au point de vue physique, géologique et agrologique une région unique. Trois pays agricoles se différencient nettement : la Montagne Vosgienne, région de petite culture sur sols gréseux, perméables et secs ; le Pays-Haut à sols argilo-calcaires, pierreux, peu profonds et le Plateau lorrain dont les terres assez fortes, souvent compactes, sont difficiles à travailler.

Sur demande de deux C. E. T. A. (1) mosellans (du Saulnois et de Vic-sur-Seille) dont les adhérents cultivent environ 10 000 ha de terres, nous avons entrepris une étude agro-pédologique de la région de Château-Salins, partie sud-est du Plateau lorrain.

La zone étudiée à topographie molle, sans aucun relief notable, est dans son ensemble une région de production assez intensive comportant à la fois céréales, productions fourragères, prairies et cultures fruitières. Les forêts de chênes, de hêtres et de charmes sont nombreuses mais d'étendue peu considérable.

Climat

La région étudiée est soumise à un climat semi-continental, c'est-à-dire aux hivers généralement longs, froids et humides, aux étés secs et chauds et aux saisons intermédiaires courtes. En outre, tout le département de la Moselle se caractérise par ses variations climatiques rapides, fréquentes et de grande amplitude. La moyenne des pluies est voisine de 750 mm avec une répartition sensiblement égale entre les deux semestres et un léger maximum de fin d'été. La température moyenne de l'hiver est d'environ 0°, celle du printemps (mars à mai) de 9°, celle de l'été 17° et celle de l'automne (septembre à novembre) de 8°. On compte en moyenne 50 jours de gelée par an.

Géologie

Le plateau lorrain, d'altitude voisine de 250 m dans la zone étudiée, a été fortement érodé au cours des temps. Les différents étages géologiques sont d'origine liasique et triasique :

— marnes et calcaires à ammonites du Charmouthien ((l^3) et du Sinémurien supérieur (l^{2b}) ;
— marnes et calcaires à Gryphées du Sinémurien inférieur (l^{2a}) ;
— grès et marnes roses du Rhétien (marnes de Levallois) ;
— marnes irisées dolomitiques du Keuper supérieur (t^3) ;
— marnes irisées et grès à roseaux du Keuper moyen (t^2) ;
— marnes bariolées avec gypse et sel du Keuper inférieur (t^1).

Couverture :

alluvions : la Seille, qui arrose une plaine large de 5 à 800 m, a déposé des alluvions récentes et anciennes de texture assez fine ; les alluvions anciennes de faible importance peuvent s'élever jusqu'à l'altitude de 100 m ;

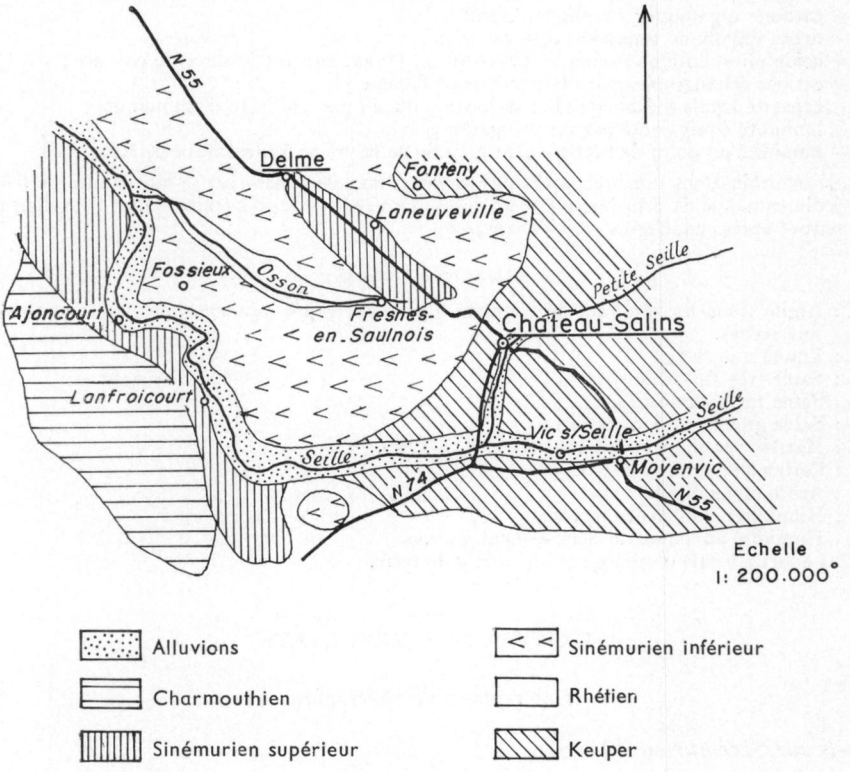
limons : l'extension des limons de couverture est assez importante ; ils ne figurent pas sur la carte géologique au 1/80 000 et ne sont mentionnés que dans la notice explicative, leur âge quaternaire ou pliocène est indéterminé.

Caractères généraux des sols

Si les facteurs topographiques et climatiques varient actuellement peu sur l'étendue de la zone prospectée (sinon à l'échelle du micro-climat et du micro-relief), les types pédologiques sont profondément influencés par la roche-mère et la nature du substratum géologique. Les sols sur Keuper et sur Sinémurien inférieur sont des sols

(1) Centres d'études techniques agricoles.

lourds (Argile > 40 p. 100), soumis à d'importants phénomènes de gonflement et de rétraction.



Carte de Situation

Les limons de couverture, que l'on trouve sur le calcaire à Gryphées et sur les argiles du Sinémurien supérieur et du Charmouthien, sont de texture argilo-limoneuse; ils donnent naissance à des terres battantes et présentent un engorgement superficiel temporaire.

Les sols du Plateau lorrain sont donc difficiles à travailler, car aux facteurs sols (structure fragmentaire grossière à continue, drainage déficient) s'ajoute le facteur climat (hiver rude et humide, inter-saisons courtes) pour réduire la durée des travaux extérieurs.

MÉTHODES ET TECHNIQUES

Nous avons choisi dans la zone étudiée un certain nombre de sols les plus caractéristiques quant à leur comportement agricole. Au cours de prospections préliminaires effectuées en liaison avec différents services officiels mosellans, de nombreux sondages à la tarière précédèrent le choix des emplacements d'une première série de 20 profils. Au vu des renseignements obtenus, deux autres séries de profils furent prélevés en vue d'un complément d'informations. En définitive, plus de cinquante profils furent ainsi analysés. Une description détaillée a été faite dans chaque cas, en insistant plus particulièrement sur la structure des sols en place et sur l'importance du système radiculaire des cultures. La caractérisation des types de sols décrits repose donc sur un ensemble de données physiques et chimiques relatives à une dizaine de profils par type de sols.

Les analyses physiques et chimiques furent effectuées sur un matériel séché à l'air libre et passé au tamis de 2 mm :

— analyse granulométrique : (méthode internationale avec décarbonatation) ;
— carbone organique : (méthode ANNE) ;
— azote organique (méthode KJELDAHL) ;
— acide phosphorique : selon SCHLOESING ou DYER, suivant le taux de calcaire ;
— cations échangeables par photométrie de flamme ;
— capacité totale d'échange (T) : saturation du sol par l'acétate d'ammonium ;
— humidité équivalente par centrifugation ;
— humidité au point de flétrissement à l'aide de la presse à membrane de RICHARDS.

Les déterminations minéralogiques des argiles furent effectuées par le laboratoire de Géologie et de Sédimentologie de Strasbourg (1) : analyses aux rayons X après traitement à l'éthylène-glycol d'une part et après chauffage à 490° d'autre part.

Abréviations utilisées

A : Argile (tous les résultats de l'analyse granulométrique sont exprimés en p. 100 de terre fine sèche),
L : Limon 2 à 20 μ,
S_{tf} : Sable très fin 20 à 50 μ
S_f : Sable fin 50 à 200 μ,
S_g : Sable grossier 200 à 2 000 μ,
M. O. : Matière organique total p. 100 = (C × 1,72),
C : Carbone organique p. 1 000,
N : Azote organique p. 1 000,
H_1 : Humidité équivalente p. 100,
H_0 : Humidité au point de flétrissement p. 100,
T : Capacité totale d'échange mé. p. 100 g de terre.

EXPOSÉ DES RÉSULTATS

Description morphologique

Les sols sur Sinémurien inférieur.

La roche-mère est en général un calcaire marneux peu fissuré. Sa décomposition donne naissance à une marne argilo-calcaire qui foisonne et gonfle en présence d'eau.

Les profils se caractérisent par la présence de bancs de calcaire bleu, d'épaisseur variable (50 à 120 cm), qui débutent généralement vers 50 cm, mais peuvent affleurer en surface dans les terrains en pente. Ces bancs alternent avec des couches d'éléments fins plus ou moins calcaires, fortement argileux et à structure polyédrique grossière. L'agencement de ces bancs n'est régulier que dans les zones plates ; dans les terrains en pente, on constate un remaniement important dont les causes essentielles sont autant les phénomènes d'érosion que l'alternance du gel et du dégel.

Profil sous forêt.

Forêt de chêne, charme, hêtre et frêne (Bois d'Amélécourt, carte I. G. N. au 1/50 000 de Nomény (406,5-228,4) Laneuveville-en-Saulnois).

A_{11} 0-4 cm Horizon moyennement humifère à décomposition rapide de la litière (on ne retrouve aucune feuille morte de plus de 2 ans d'âge). La structure est à tendance grumeleuse; le mélange entre la matière organique et la matière minérale est hétérogène. Nous sommes en présence d'un Mull moyennement alcalin à C/N = 12,5.

A_{12} 4-11 cm Horizon brun-beige — structure polyédrique assez fine à arêtes

(1) Nous présentons nos vifs remerciements à M. le Professeur MILLOT et à Mlle PAQUET.

vives — mélange hétérogène entre matière organique et matière minérale. La matière organique est incluse entre les polyèdres — peu de racines — présence de quelques éléments caillouteux mélangés aux éléments fins (le banc de calcaire bleu débute vers 55 cm).

(B) 11-26 cm Beige-clair — structure polyédrique nettement plus grossière ; développement maximum des racines. Les agrégats polyédriques sont enrobés d'un film d'argile et d'un peu d'humus. Il y a eu une très légère migration d'argile. Augmentation du taux des cailloux — présence de nombreux mycéliums de champignons.

B/C 26-51 cm Horizon beige-jaunâtre assez calcaire, structure assez massive — nombreuses concrétions ferrugineuses — peu de racines et de mycéliums fongiques.

C/Ca 54-80 cm Mélange de blocs de calcaire bleu (60 p. 100) et d'éléments fins présentant une structure à tendance polyédrique. Présence de nombreuses racines aplaties s'insérant entre les blocs de calcaire — absence des mycéliums fongiques.

Ce sol présente un profil de type A, (B), C analogue à celui d'un sol brun calcaire.

Profil sous culture.

Champ de blé d'hiver, commune de Manhoue, carte I. G. N. au 1/50 000 de Nomeny (398,7 — 225,5)

Ap 0-20 cm Horizon brun beige foncé (10 Y/R 4/3-4/2) (*) fortement argileux — structure à tendance polyédrique (si le taux d'humus est assez élevé (> 3 p. 100), la structure manifeste une tendance grumeleuse) — taux de calcaire généralement faible — pH moyennement alcalin — Sous prairie l'épaisseur du sol prospecté par les racines dépasse rarement 20 cm — présence de nombreux grains d'oxyde de fer de la taille de petit pois.

(B) 20-45 cm Horizon plus argileux et plastique (couleur 10 Y/R 4/4-4/3) — structure polyédrique, parfois prismatique avec une tendance columnaire. Le taux de calcaire est légèrement supérieur à celui de l'horizon de surface — quelques fines racines arrivent encore à traverser.

B/C 45-120 cm Horizon de teinte 5 Y 6/2-6/1. Début des blocs de calcaire bleu — disposition irrégulière — interstices remplis d'éléments fins jaunâtres à structure plutôt massive — présence de taches rouille, de pseudomyceliums calcaires.

C 120-200 cm Couleur 2,5 Y 5/6-5/4, mélange de roches et d'éléments fins calcaires — concrétions de fer et de manganèse — structure à tendance massive — encore quelques racines fines.

Dans les zones d'érosion, l'épaisseur des profils est variable, mais assez faible en général. Les bancs de calcaire bleu ont été ramenés vers la surface. Il en est résulté un rajeunissement des sols du fait de la présence de nombreux fragments de roches calcaires. La recarbonatation semble également se maintenir grâce aux travaux aratoires qui continuent à mélanger l'horizon de surface aux éléments sous-jacents. Les sols sont de type rendziniforme à profil AC, mais la structure reste polyédrique. Selon DUCHAUFOUR (1950), une phase de cryoturbation serait la cause du mélange des fragments de calcaire et des éléments fins.

Dans les zones d'accumulation, les sols sont assez épais avec une tendance à la

(*) Teintes correspondant au Munsel Soil Color Charts (Baltimore)

pseudogleyification. Les traînées rouille sont très importantes et nombreuses, de même que les zones réductrices en profondeur. Les bancs de calcaire sont généralement plus diffus et profonds. La décarbonatation est plus accentuée et nous pouvons avoir des sols de type Ag (B) à structure polyédrique ou prismatique.

Les sols sur Keuper.

La roche-mère est une marne à taux de calcaire variable, assez friable et vivement teintée de jaune, de rouge et de vert. Selon que telle ou telle teinte affleure en surface, les agriculteurs parlent de Terre grise, rouge, brune. Nos observations ne portent que sur des terres grises essentiellement sur t^3 et des terres rouges que l'on peut trouver aussi bien sur t^2 que sur t^3.

Profil de « Terre rouge ».

Situation : champ de blé d'hiver, commune de Fonteny carte au 1/50 000 de Nomeny, 407,3-231,9 — légère pente.

Ap 0-25 cm Couche arable brun violacé (5 YR 4/2-4/3), calcaire, structure polyédrique à tendance grumeleuse — nombreuses racines — activité biologique intense.

(B) 25-50 cm Brun-rouge foncé (5 YR 3/4), structure encore légèrement polyédrique avec tendance à l'aplatissement — très calcaire, nombreuses racines.

C 50-200 cm Marnes irisées avec alternance de couches rouge foncé et de couches vert-grisâtre. Certaines couches rouges sont peu calcaires et litées horizontalement, d'autres sont fortement calcaires et composées de blocs durs.

Profil de « Terre grise ».

Situation : Haut de Burthecourt (feuille de Parroy 1/2 au 1/20 000 — 905,2-127,5) — Orge de printemps.

Ap 0-25 cm Gris légèrement brunâtre (10 YR 3/4-4/4) fortement calcaire (calcaire dur) — compact — très plastique — très difficile à travailler.

(B) 25-50 cm 10 YR 5/2 — 6/2 — structure fragmentaire légèrement polyédrique — nombreuses concrétions de Fe — très calcaire.

C 50-140 cm Marne très dure, litée, gris clair à gris brun.
140-170 cm Banc de roches dures dolomitiques.
170-250 cm Marnes irisées à litage horizontal.

La pédogénèse de ces sols est très ancienne et les phénomènes de solifluction et de colluvionnement les ont profondément marqués. Selon certains auteurs allemands (S. MULLER, 1961), les sols sur Keuper issus de roches-mères non calcaires (argile) ou de marnes fortement décarbonatées présentent une très mauvaise structure peu intéressante pour la culture. Dans la zone étudiée, tous les sols sur Keuper sont calcaires, mais la teneur des horizons superficiels peut varier dans de fortes proportions selon que les profils se situent en zone d'érosion ou en zone d'accumulation. Ces sols à profils A (B) C peuvent se ranger dans la classe des Vertisols.

Les sols sur limons de couverture.

La couverture limoneuse est assez importante dans la zone étudiée. Nous l'avons trouvée par petits lambeaux de quelques dizaines d'hectares sur le calcaire à Gry-

phées (type I) et par grandes surfaces sur les argiles non calcaires du Sinémurien supérieur et du Charmouthien (type II). Ces limons appelés par les agriculteurs « Terres blanches » sont généralement de faible épaisseur (40-60 cm). Les profils trouvés sont toujours complexes du fait de la superposition de deux matériaux dont le supérieur (limons) ne semble avoir aucun rapport évolutif direct avec le matériau sous-jacent (socle liasique).

Profil type I.

Couverture limoneuse sur calcaire à Gryphées.

Situation : Terre de labour — Commune de Manhoue (carte de Nomeny au 1/50 000) (399,3 — 226,4) très légère pente.

Ap 0-20 cm Terre brun foncé (10 YR 4/2-4/3). Structure légèrement grumeleuse, faibles traces de calcaire, absence d'éléments grossiers, assez friable.

(B)/Cg 20-60 cm Brun plus clair, (10 YR 4/3-4/4). Structure prismatique à tendance columnaire, faibles traces de calcaire, concrétions de fer et de manganèse — pseudogleyification assez marquée — texture plus argileuse.

D_1g 60-100 cm Horizon jaunâtre (10 YR 5/3) très argileux, assez compact, structure encore légèrement columnaire — nombreuses concrétions ferrugineuses — traces de calcaire.

D_2 100-200 cm Banc de calcaire bleu, fortement remanié, mélangé à des éléments fins très argileux et calcaires, encore nombreuses concrétions de Fe et Mn.

Profil type II.

Couverture limoneuse sur argile du Sinémurien supérieur.

Situation : Commune de Bey-sur-Seille (Carte de Nomeny au 1/50 000) (396,3-222,3). Terre de labour très limoneuse, très battante et à faible rendement.

Ap 0-18 cm Teinte gris-beige assez foncé (10 YR 4/3-4/2) non calcaire, structure légèrement feuilletée. Terre très battante, nombreuses racines, bonne activité zoogène.

(B) 18-40 cm Horizon plus clair (10 YR 4/4), bon calcaire — structure polyédrique à tendance lamellaire — quelques nodules de fer et de manganèse — assez nombreuses racines.

40-90 cm Structure prismatique à tendance columnaire — début de la pseudogleyification — présence de quelques racines fines.

90-150 cm Maximum des concrétions de Fe et de Mn.

D 150-200 cm Argile bariolée : gris bleuté-jaune, très collante.

Ces sols sont à classer dans le sous-groupe des sols bruns hydromorphes de la classe des sols à Mull.

Sols alluviaux de la Seille.

Quelques profils sur alluvions anciennes et récentes de la Seille ont également été étudiés. Ces sols sont généralement profonds (> 150 cm), complètement décarbonatés et à pH légèrement acide. La structure, grumeleuse en surface, devient polyédrique en profondeur. La tendance évolutive de ces sols se fait vers les sols bruns faiblement lessivés à profil A, B, C avec une légère marmorisation au niveau de l'horizon B.

Granulométrie

Les figures 1 *a*, 1 *b*, 1 *c*, illustrent les variations des spectres granulométriques relatifs aux horizons de surface des principaux types de sols. Les sols sur Sinémurien inférieur (fig. 1 *a*) et sur Keuper (fig. 1 *b*) sont essentiellement de texture argileuse (taux d'argile moyen supérieur à 40 p. 100). Mais contrairement aux sols sur Sinémurien inférieur, dont les spectres sont d'une uniformité assez remarquable, les sols sur Keuper présentent des variations plus amples selon que le faciès qui affleure est plus ou moins sableux.

Les limons de couverture (fig. 1 *c*) ont une texture argilo-limoneuse et les éléments compris entre 2 et 50μ représentent en moyenne plus de 58 p. 100.

La texture des sols alluviaux de la Seille est argilo-limono-sableuse ; pour un taux d'argile moyen de 20,5 p. 100, la teneur en éléments compris entre 2 et 50 μ se situe autour de 40 p. 100, alors que dans les sables (moyenne : 35 p. 100) la fraction fine est nettement dominante (25,5 p. 100) par rapport au sable grossier (8 p. 100).

Composition minéralogique des argiles.

Dans l'impossibilité matérielle de faire effectuer l'analyse des argiles sur des profils entiers, nous avons dû nous restreindre à un certain nombre d'échantillons d'horizons de surface représentatifs des principaux types de sols rencontrés. Les résultats sont consignés dans le tableau 1 (les chiffres indiqués n'ont qu'une valeur relative).

A côté de la montmorillonite (M) et de l'illite (I), le laboratoire de Strasbourg a déterminé deux mélanges ; un premier mélange C (K) de chlorite et de kaolinite, dont il a été très difficile d'apprécier l'importance respective des constituants et un second édifice (10-14 Å) comportant des interfoliaires de type illite et des interfoliaires gonflants de type montmorillonite interstratifiés irrégulièrement.

Il ressort de ces déterminations que les argiles des limons sont très voisines de celles des sols du Sinémurien. Il s'agit d'un complexe (10-14 Å) d'édifices gonflants, dont la présence explique l'engorgement temporaire de ces sols en période humide. La fraction fine des deux Keuper est identique ; elle comporte une illite ouverte légèrement dominante sur la montmorillonite. Sur un échantillon de Rhétien non décrit dans ce mémoire, la kaolinite représente la moitié de la fraction fine, l'autre moitié étant constituée par la montmorillonite et l'illite.

État chimique

Les données analytiques essentielles sont consignées dans le tableau 2.

Calcaire et pH.

Dans les deux types de sols du Sinémurien inférieur et du Keuper, le calcaire représente un élément constitutif dont les proportions sont très variables : dans les horizons superficiels, les teneurs oscillent entre des traces et 9,0 p. 100 pour le Sinémurien et entre 1,8 et 44,3 p. 100 pour le Keuper, les teneurs élevées correspondant à des

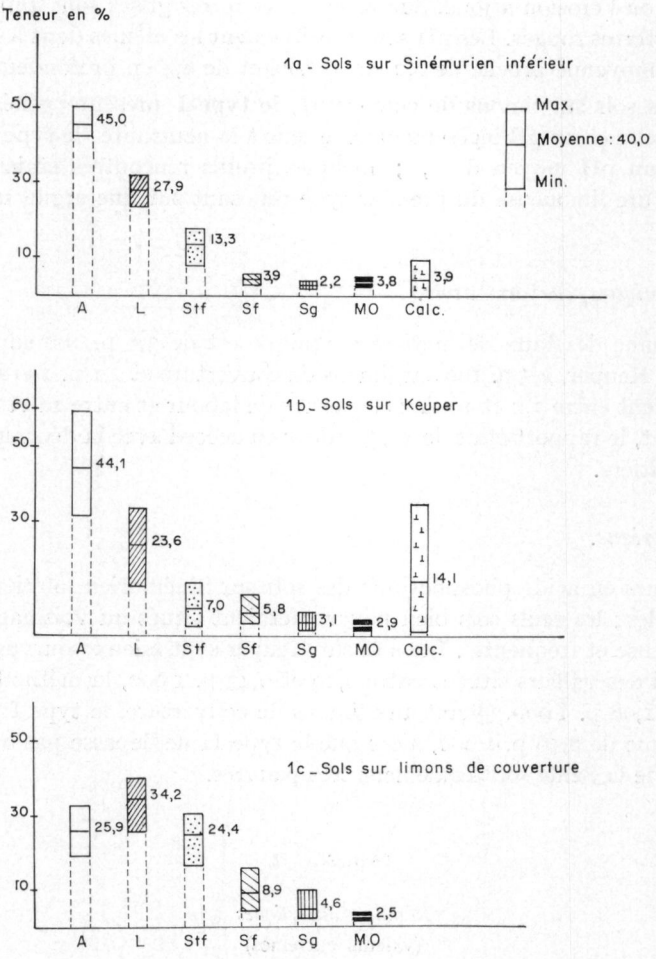


FIG. 1. — *Spectres granulométriques des horizons de surface*

TABLEAU I

Origine géologique	M	(10-14 Å)	I	C (K)
Sinémurien inf.		7		3
Limons type I		7		3
Limons type II		7		3
Keuper : terre grise	4		6 ouv.	traces
Keuper : terre rouge	4		6 ouv.	traces
Rhétien	3		2	K_5

sols en pente où l'érosion a joué. Sur Keuper, les terres grises sont toujours plus calcaires que les terres rouges. Les pH sont sensiblement les mêmes dans les deux formations, valeur moyenne proche de 8,0 en surface et de 8,4 en profondeur.

Parmi les sols sur limons de couverture, le type I présente généralement des traces de calcaire et un pH légèrement supérieur à la neutralité ; le type II est décarbonaté avec un pH moyen de 5,8 ; quelques profils rencontrés étaient constitués d'une couverture limoneuse du premier type reposant sur une argile moyennement acide.

Matières organiques, carbone, azote.

La moyenne des taux de matière organique est de 3,8 p. 100 sur Sinémurien, 2,8 p. 100 sur Keuper, 2,5 p. 100 sur limons de couverture et 2,1 p. 100 sur alluvions. Les C/N oscillent entre 7,2 et 10 dans les terres de labour et entre 11 et 12 sous prairies ; sous forêt, le rapport était de 12,5, valeur en accord avec la décomposition assez rapide de la litière.

Acide phosphorique.

Les teneurs en acide phosphorique des sols sur Sinémurien inférieur sont généralement faibles ; les seuls sols bien pourvus étaient situés au voisinage des fermes (fumure copieuse et fréquente). Les sols sur Keuper sont mieux pourvus, la méthode Dyer a fourni des valeurs situées entre 0,29 et 0,43 p. 1 000, la méthode Schloesing entre 0,58 et 1,08 p. 1 000. Quant aux limons de couverture, le type I présente une teneur moyenne de 0,16 p. 1 000, alors que le type II ne dépasse pas 0,09 p. 1 000 ; les alluvions de la Seille sont également très pauvres.

TABLEAU 2

Résultats analytiques
(valeurs extrêmes)

	Sols sur Keuper	Sols sur Sinémurien inférieur	Limons de couverture		Sols alluviaux
			Type I	type II	
pH	7,8 - 8,3	7,1 -8,2	6,8 - 7,7	5,5 - 6,4	5,75- 6,4
M. O.	2,5 - 3,5	2,7 -4,4	1,4 - 2,9	1,8 - 3,6	1,8 - 2,2
C/N	7,2 - 9,4	7,9 -9,2	7,2 - 9,8	7,7 -10,0	8,4 - 9,6
P_2O_5 Schlœsing	0,58- 1,08	0,03-0,20	—	—	—
P_2O_5 Dyer	0,13- 0,81	0,09-0,31	0,07- 0,23	0,03- 0,09	0,03- 0,09
K_2O échang.	0,32- 1,21	0,34-0,62	0,19- 0,35	0,12- 0,23	0,09- 0,15
Ca —	—	—	12,42-16,90	5,03-13,09	9,20- 9,37
Mg —	8,96-11,60	2,32-3,91	1,49- 2,66	1,37- 2,75	1,43- 2,42
Na —	0,11- 0,28	0,13-0,29	0,12- 0,27	0,22- 0,27	0,20- 0,26
T —	—	—	12,60-23,0	9,94-24,5	16,58-16,8
V p. 100	—	—	65-90	65-72	65-70

(Mg, Na, T : mé p. 100 g de terre ...)

Potassium.

Le taux de potassium échangeable des sols sur calcaire à Gryphées est assez élevé (moyenne 0,49 p. 1 000), mais reste inférieur à la moyenne des sols sur Keuper qui atteint 0,76 p. 1 000. Le type I des limons de couverture présentent une moyenne de 0,27 p. 1 000, le type II, acide, reste légèrement en-dessous de 0,20 p. 1 000. Les sols alluviaux se placent au plus bas de l'échelle.

Bases échangeables.

Les teneurs en sodium échangeables sont faibles et du même ordre de grandeur pour l'ensemble des sols (0,15 à 0,30 mé. p. 100 g). Les teneurs en Mg varient par contre beaucoup : la moyenne des sols sur Sinémurien inférieur est de 2,9 mé. p. 100 g (soit 0,58 p. 1 000 de MgO) ; elle s'abaisse à 2 mé. dans les limons et les alluvions, mais s'élève à 9 mé. dans les sols sur Keuper du fait de la richesse de la roche-mère en cet élément.

Réserves hydriques

L'humidité équivalente H_1 (centrifugation dans un champ de 1 000 g) est une constante conventionnelle qui correspond sensiblement à la quantité d'eau retenue par un sol ressuyé. Le point de flétrissement permanent (Ho) est également arbitraire ; des études récentes (LEMÉE M. G., 1959 ; HALLAIRE M., 1959) ont montré que l'eau était utilisable par la plante de part et d'autre de cette valeur et que cette variation était fonction de la plante et de la vitesse instantanée de dessèchement du sol. Ces restrictions posées, les différences H1-Ho peuvent néanmoins être considérées comme proportionnelles à la réserve en eau utile d'une couche de sol d'épaisseur unitaire et fournir un indice valable de l'ordre de grandeur des réserves hydriques d'un sol. Dans le tableau 3 sont consignées les valeurs trouvées dans les horizons de surface des différents types de sols.

TABLEAU 3

	Humidité équivalente : H_1	Humidité à pF = 4,2 : H_0	H_1-H_0 p. 100
Horizons argileux du Sinémurien inf.	25,7 à 28,3	17,1 à 20,8	7,5 à 9,6
Horizons argilo-calcaires sur Keuper.	29,4 à 31,3	17,2 à 21,7	10,4 à 12,2
Limon : type I (argilo-limoneux)...	20,2 à 24,7	8,2 à 12,8	11,4 à 12,4
Limon : type II (argilo-limoneux)...	24,7 à 28,1	8,5 à 16,4	11,6 à 15,5

DISCUSSION

Bilan et comportement hydriques

Il est intéressant de constater que les sols à texture argileuse possèdent une gamme d'humidité utile plus faible que les sols à texture argilo-limoneuse. Cette gamme se trouve encore élargie en présence de calcaire (les sols du Keuper et certains profils sur Sinémurien inférieur) et surtout en présence de matière organique qui a

pour effet d'augmenter relativement plus H1 que Ho, d'où une différence (H1-Ho) plus élevée dans les horizons superficiels sous prairie. Mais les réserves totales réellement utilisables d'un sol dépendent également de l'épaisseur du sol exploitable et effectivement exploitée par la culture... Nous n'avons pratiquement jamais rencontré de racines vivantes au-delà d'une cinquantaine de cm ; soit qu'elles sont venues butter sur le banc du calcaire bleu du Sinémurien inférieur ou sur les argiles compactes du Sinémurien supérieur et du Charmouthien ; soit qu'elles furent arrêtées par les couches dolomitiques du Keuper. En admettant une densité apparente de 1,4, le calcul des réserves des sols pour une profondeur de 60 cm a fourni les résultats suivants : 50 à 70 mm pour les sols du Sinémurien inférieur, 80 à 100 mm pour quelques sols du Keuper, 85 à 105 mm pour les limons du type I et 110 à 130 pour les limons du type II. La participation des argiles du sous-sol n'est certainement pas négligeable, mais difficilement appréciable, car il n'est pas sûr que, en raison de leur compacité, de leur structure et de la discontinuité due à la superposition d'horizons de texture variable, tous ces horizons puissent fonctionner comme pourrait le laisser supposer la différence pF3-pF4,2.

Les phénomènes d'hydromorphie de ces sols ont des causes multiples : sur Sinémurien inférieur et Keuper, c'est essentiellement la texture fine à argiles « gonflantes » qui réduit le drainage ; quant aux limons, c'est la présence en profondeur d'un substratum argileux imperméable qui empêche l'infiltration des eaux météoriques et maintient un engorgement superficiel de durée plus ou moins variable.

On observe une amélioration du drainage des sols du Sinémurien inférieur dans les stations où l'érosion a été importante et où les éléments fins sont mélangés aux fragments de calcaire sous-jacents. Dans ces zones, le taux de calcaire est proche de 10 p. 100, le sol devient plus friable, la structure tend à devenir un peu grumeleuse en surface et, en profondeur, les agrégats polyédriques diminuent de taille. Les conséquences agronomiques dues à ce remaniement ne sont donc pas négligeables, car à l'amélioration du drainage vient s'ajouter une meilleure pénétration des racines.

Les sols argilo-limoneux des limons de couverture présentent une forte tendance à la battance ; toute pluie qui tombe après un travail de ces sols occasionne un glaçage immédiat, suivi d'un tassement important qui accentue encore les phénomènes d'hydromorphie amorcés par la présence d'un niveau imperméable. La richesse en éléments de 2 à 50 μ explique bien le comportement de ces sols. Les conditions asphyxiantes et réductrices sont fréquentes et l'on peut rencontrer de place en place des accumulations de fer sur les jeunes racines, indiquant que ces phénomènes se sont produits au moment de la croissance de celles-ci.

Ces accidents sont plus fréquents sur les limons du type II où l'on rencontre le maximum de concrétions de Fe et de Mn ; ceci est dû au fait que ces limons décarbonatés et acides reposent sur une couche d'argile absolument imperméable alors que les calcaires à Gryphées du Sinémurien inférieur possèdent encore une certaine perméabilité. Sur les sols du Keuper le drainage est également insuffisant et les conditions asphyxiantes assez fréquentes en saison humide.

En définitive, dans la majorité de ces sols les pluies pénètrent difficilement, si bien que l'eau ruisselle déjà sur pente faible et se rassemble au fond des cuvettes. Dans les bas-fonds, les horizons superficiels gonflent et l'intérieur des profils ne reçoit qu'une fraction des eaux pluviales, aussi l'approvisionnement hydrique risque-t-il d'être, sinon insuffisant, du moins inférieur à la quantité calculée précédemment.

Considérations agronomiques

La majorité des sols labourés présentent des taux de matière organique trop faibles pour ameublir les sols argileux (Sinémurien inférieur et Keuper) et restructurer les limons de couverture. Il est donc souhaitable de mettre l'accent sur des amendements organiques copieux, mais surtout de tendre vers une augmentation du taux d'humus par le choix judicieux d'un assolement, d'un système de culture et de techniques culturales. L'introduction dans l'assolement de prairies temporaires serait doublement bénéfique : élévation du taux d'humus et amélioration de la structure, alors que l'enfouissement des pailles nécessite une attention toute particulière quant à l'exécution des travaux aratoires.

Mis à part les sols sur Keuper généralement riches, tous les autres types de sols sont plus ou moins déficients en acide phosphorique ; les limons du type II et les sols alluviaux sont même franchement pauvres et nécessitent une fumure phosphatée copieuse.

Les taux de potassium sont plus variables : les deux séries argileuses (Sinémurien inférieur-Keuper) sont bien pourvues, mais vu le faible volume généralement prospecté par les racines, l'obtention de récoltes élevées nécessite l'apport de doses considérables d'engrais potassiques, d'autant plus que ces sols, caractérisés par une dominance d'illite et de montmorillonite ou de leurs interstratifiés, présentent des phénomènes de rétrogradation non négligeables. La fumure potassique devra donc être calculée assez large de manière à garantir un état d'assimilabilité suffisant des ions K^+. Parmi les limons de couverture, le type II moyennement acide est plus pauvre que le type I à réaction neutre ; compte tenu de la nature minéralogique de leur fraction fine (70 p. 100 d'un complexe illite et interstratifié illite-montmorillonite), leurs besoins en engrais potassiques sont élevés.

Sur les sols argileux le labour donne naissance à de grosses mottes qui ne se délitent correctement qu'après le passage du gel et du dégel. Les agriculteurs préfèrent donc en général les labours d'automne aux labours de printemps dont la période d'application, déjà très réduite du fait des intersaisons courtes, est encore retardée par l'impossibilité de pénétrer dans les champs avant l'élimination de l'excès d'humidité. Mais en année humide l'engorgement en eau empêche également l'accès des terrains en automne. Sur les sols du Keuper, à taux d'argile moins élevé (25 à 30 p. 100) les travaux aratoires se font plus facilement et il sera possible d'augmenter peu à peu la profondeur des labours. Quant aux sols sur limons, les deux techniques sont utilisées : soit la préparation automnale soit le tout au printemps. Cette seconde solution est souvent intéressante dans ces terres battantes car les pluies hivernales peuvent annihiler complètement les travaux d'automne du fait d'un retassement du sol, mais en année humide elle reste la seule réalisable pour la même raison citée plus haut.

Plusieurs solutions proposées vont être expérimentées par les deux C. E. T. A. en vue de l'ameublissement des sols argileux, de la restructuration des limons battants et d'une meilleure accessibilité de l'ensemble de ces terrains en période humide.

Sols argileux : les labours d'automne sont généralement suivis au printemps par un travail superficiel ; une reprise dans la masse au printemps par un second labour devrait être efficace tant au point de vue assèchement et aération du sol qu'au point

de vue réduction du tassement dû aux roues des tracteurs. Le travail dans le sens de la pente s'est avéré intéressant (meilleur écoulement de l'eau), si bien que les labours en planches abandonnés depuis l'utilisation des tracteurs devraient à nouveau retrouver leur place dans les façons culturales de ces sols lourds. La mise en place des prairies temporaires préconisées pose un problème de semis et de levée ; une couverture de fumier bien fait et pas trop pailleux devrait augmenter considérablement les chances de succès. Des mélanges de graminées et de légumineuses vont être expérimentés en vue d'apprécier leur efficacité respective sur le plan de l'amélioration de la structure (ray-grass d'Italie-trêfle violet, fétuque élevée-trêfle blanc, luzerne-dactyle).

Terres battantes : l'utilisation d'un modelé des champs, sous forme d'ados très larges tels que ceux utilisés dans les Dombes devrait garantir une meilleure élimination des eaux de ruissellement. D'autre part des amendements organiques copieux s'imposent de même que la mise en place de prairies temporaires à base de graminées à système radiculaire puissant.

Les quelques valeurs de stabilité structurale qui ont été déterminées sont insuffisantes pour compléter l'étude granulométrique des terres en question et rendre compte de l'ensemble de leurs propriétés physiques. On constate néanmoins que sur sols argileux du Sinémurien inf. et du Keuper les taux d'agrégats air et alcool sont moyens, voire élevés, alors que les taux d'agrégats, après prétraitement benzène, sont faibles malgré des teneurs en matière organique supérieures à 3 p. 100. Sur limons du type II, l'influence améliorante de la prairie est particulièrement nette, le rapport des taux d'agrégats air et benzène étant de 3 à 1 en faveur du sol sous prairie.

Les marnes du Keuper présentent fréquemment vers 30-50 cm de profondeur un litage horizontal qui empêche la pénétration des racines. Il se pose le problème de l'éclatement de cette couche par un sous-solage ; nous estimons cette solution rentable (meilleure pénétration des racines, très bonne stabilité, aucun risque de libérer des nappes d'eau sous pression) mais, avant d'inciter les agriculteurs à employer cette technique, seule une expérimentation sur le terrain (d'ailleurs envisagée par les deux C. E. T. A.) pourra renseigner sur son efficacité et son opportunité.

En définitive, l'amélioration du drainage en vue d'un accès plus facile des terrains reste un des principaux buts pratiques à atteindre. A cet effet, des expériences de drainage-taupe et de sous-solage vont être entreprises sur les différentes formations et plus particulièrement sur les deux types de limons, en vue de juger de la valeur de ces techniques. Sans pouvoir préjuger pour le moment de la durée des drains et de l'efficacité d'un sous-solage, du fait d'un trop petit nombre de mesures de stabilité structurale, la mise en place d'une prairie temporaire sur un terrain fraîchement drainé ou sous-solé ne pourra que prolonger l'effet bénéfique de ces techniques.

CONCLUSIONS

La région de Château-Salins, qui a fait l'objet d'une étude pédologique et agronomique couvre une superficie de l'ordre de 10 000 ha.

Les types de sols rencontrés sont profondément influencés par la nature du substratum géologique ; ils procèdent de roches-mères issues du Trias et du Lias

essentiellement marneux, de limons de couverture d'origine éolienne et d'alluvions anciennes et récentes.

Les phénomènes d'érosion, de solifluction et de colluvionnement furent fréquents au cours du temps, si bien que bon nombre de profils étudiés doivent leurs caractères pédologiques davantage à leur histoire ancienne qu'au climat et qu'à la végétation actuelle.

Les profils, de profondeur moyenne à élevée, sont constitués d'éléments fins, de texture argileuse sur Keuper et Sinémurien inférieur et de texture argilo-limoneuse pour les limons de couverture ; sur Sinémurien inférieur des bancs de roches calcaires (calcaire à Gryphées) peuvent affleurer de place en place.

L'état calcique et la réaction des sols sont variables : acides sur limons du type II, décarbonatés mais à réaction neutre où légèrement alcaline sur limons du type I, calcaires et à pH toujours supérieur à 8 sur Keuper. Sur Sinémurien inférieur les sols colluvionnés sont décarbonatés sur une certaine profondeur, mais en pente, les phénomènes d'érosion et les travaux aratoires rajeunissent les sols en mélangeant à l'horizon superficiel des éléments calcaires du sous-sol.

La majorité des sols étudiés présentent des teneurs en matière organique faibles et une certaine déficience en acide phosphorique ; seuls les sols sur Keuper sont bien pourvus en cet élément. Abstraction faite des sols alluviaux et des limons acides, pauvres en potassium, les autres types en sont assez bien pourvus, voire riches ; mais vu les fortes teneurs en argile de type illite et interstratifié illite-montmorillonite, les besoins restent assez élevés.

Les conditions hydriques sont défavorables : le drainage est généralement insuffisant et les conditions asphyxiantes fréquentes en saison humide. Les phénomènes de pseudogleyification sont dus essentiellement à la présence d'argiles « gonflantes » dans les sols argileux et à la présence en profondeur d'un substratum imperméable dans les limons. La durée de la phase d'engorgement peut être plus ou moins longue et conditionner dans une large mesure la valeur agrologique de ces sols.

L'exploitation rationnelle de ces sols pose des problèmes d'amélioration de la structure et d'assainissement des terrains. Certaines solutions ont été proposées et des expériences vont être tentées par les C. E. T. A., en liaison avec l'Institut National de la Recherche Agronomique, en vue de l'ameublissement des terrains argileux (labours d'automne repris par un labour de printemps, labours en planches, mise en place de prairies temporaires avec expérimentation comparative de différents mélanges de graminées et de légumineuses) et de la restructuration des limons battants (amendements organiques plus copieux, mise en place de prairies temporaires avec expérimentation comme précédemment, cultures en ados larges). En vue d'un accès plus facile des terrains par amélioration du drainage, des expériences de drainage-taupe et de sous-solage vont être tentées en relation avec la mise en place de prairies temporaires et des mesures de stabilité structurale.

Reçu pour publication en juin 1968.

SUMMARY

CONTRIBUTION TO THE AGRO-PEDOLOGICAL KNOWLEDGE
ABOUT THE HEAVY SOILS OF LORRAINE

An agronomical and pedological survey has been effected in the Château-Salins area (Moselle). About fifty profiles have been described and analyzed, specially as regards the structure of soils and the extent of root systems.

The diverse types of soils arise from marly Trias and Lias parent-rocks, from overburden loams and alluvial deposits. Considerably influenced by the nature of the geological substratum, these soils result from a very ancient pedogenesis and their pedological features are more contingent on their history than the current climate and vegetation.

Hydrological conditions are rather unfavourable, the drainage often inadequate and hydromorphic phenomena frequent. Farming of these soils raises drainage problems and would require improved structure. Solutions have been proposed for loosening the clay soils and restructuring the surface-compacted loams. Mole-draining and subsoiling experiments will be carried out concomitantly with temporary grass-land.

ZUSAMMENFASSUNG

AGRO-PEDOLOGISHER BEITRAG ZUR LOTHRINGENS SCHWEREN BÖDEN

Eine pedologische und agronomische Studie wurde in der Gegend von Château-Salins ausgeführt (Mosel). Mehr als fünfzig Bodenprofile wurden beschrieben und zur Analyse herangezogen ; Bodengefüge und Bodendurchwurzelung wurden besonders berücksichtigt.

Die angesprochenen Bodentypen enstanden aus Trias-und Liasmergeln, aus Lehmen und aus alluvialem Ausgangsmaterial. Die Bodenbildung dieser stark geologisch bedingten Böden ist sehr alt und die pedologischen Merkmale sind weit mehr durch ihre Entwicklungsgeschichte als durch die aktuellen Klima-und Vegetationsbedingungen beeinflusst.

Die Wasserverhältnisse sind vorwiegend ungünstig, die Dränung ungenügend und die Vernässungserscheinungen häufig. Die landwirtschaftliche Bodennutzung wirft Dränage-und Strukturverbesserungsprobleme auf. Mittel zur Auflockerung der tonhaltigen Böden und zur Gefügebildung der Lehme wurden vorgeschlagen. Maulwurfdränungs-und Untergrundlockerungsversuche werden in Beziehung zur Wechselgraswirtschaft unternommen.

РЕЗЮМЕ

К агрономическо-педологическому изучению тяжелых почв Лотарингии.

Г. МЕТТАУЭР.

Автор предпринял педологическое и агрономическое изучение почв района Шато Сален в департаменте Мозелль. Он описывает и анализирует пять десятков профилей, с уделением особенного внимания почвенной структуре на местах и размерам корневой системы растений.

Встреченные типы почв относятся к материнским, главным образом мергелевым породам Триаса и Лиаса, суглинистого покрытия и наносов. Эти почвы, находящиеся под сильным влиянием природы геологического субстрата, — очень древнего происхождения, и их педологическая характеристика больше зависит от истории их генезиса чем от современных климата и растительности.

Условия влажности очень неблагоприятны, дренажи часто недоста-

точны, как часты и явления гидроморфии. Окультуривание этих почв ставит сложные задачи дренажа и упрочнения структуры. Были предложены меры для рыхления глинистых почв и для улучшения структуры непрочных суглинков. Вскоре будут проведены опыты кротового дренажа и плантажной вспашки в связи с устройством на этих почвах временных лугов.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BONNEAU M., 1961. Évaluation au laboratoire de la capacité au champ en fonction de la texture. *Bull. Ass. fr. Et. Sol*, **8**.

BRUNNACKER K., 1963. Die schweren Böden Bayerns in geologischer und bodengeschichtlicher Sicht. *Bayer. landw. Jb.*, **40**, H. 3, p. 322-333.

DUCHAUFOUR Ph., 1950. Recherche sur l'évolution des sols calcaires en Lorraine. *Ann. Ec. nation. Eaux et Forêts*, **12** (1).

DUCHAUFOUR Ph., 1960. *Précis de Pédologie*. Masson Paris.

HALLAIRE M., 1953. Diffusion capillaire de l'eau dans le sol et répartition de l'humidité en profondeur sous sols nus et cultivés. *Ann. agron.*, **2**, p. 143-245.

HALLAIRE M., 1959. La diffusion de l'eau dans le sol et l'alimentation hydrique des plantes annuelles. *Bull. Soc. Fr. Phys.*, 5 p., 133-140.

HENIN S. et coll., 1960. *Le profil cultural. Principes de physique du sol*, 320 pages, S. E. I. A., Paris.

KUBIENA W. L., 1953. *Bestimmungsbuch und Systematik der Böden Europas*. Verlag. Stuttgart.

LEMEE G., 1959. Le Bilan d'eau des plantes vasculaires dans ses rapports avec l'humidité du sol. *Bull. Soc. fr. Physiol. vég.*, 5 p., 118-132.

LUCAS J., 1962. La transformation des minéraux argileux dans la sédimentation. Études sur les argiles du Trias. *Mém. Serv. Carte géol. Als. Lor.*, nº 23, 202 pages.

MULLER S., 1961. Grundzüge der Bodenbildung im Württembergischen Keuperland. *Mitt. Vereins. Forstl. Stanfl. Forstpfl.*, **11**, p. 3-60.

MUCKENHAUSEN E., 1963. Le pseudogley. *Sci. Sol*, **1**, p. 21-29.

MUCKENHAUSEN E., 1964. Die schweren Böden Europas, Z. *Pflanzenernähr.*, **104**, H. 2, p. 97-109.

PERIGAUD S., 1963. Contribution agronomique à la mise en valeur de la Brenne. *Ann. agron.*, **14** (2) 121-193 (1re partie), **14** (3) 261-377 (2e partie).

RICHARDS L. A., 1947. Pressure-membranne apparatus . Construction and use. *Agricultural Engineering*, **23**, p. 451-460.

RID H., et coll., 1962. Untersuchung zur Dynamik Schwerer Böden (2º Mitteilung) Böden des südlichen Frankenjura. *Bayer. landw. Jb.*, **39**, p. 7-18.

Ann. agron., 1968, **19** (4), 459-471.

NOUVELLES DONNÉES SUR LA FERTILISATION POTASSIQUE DES PLANTES FOURRAGÈRES EN SOL GRANITIQUE

Suzanne MÉRIAUX, A. LIBOIS, Ruth GROSMAN
avec la collaboration technique de P. AUBRY et G. LAVIELLE

Station d'agronomie,
Centre de Recherches agronomiques du Centre-Est, 21 - Dijon
Institut national de la Recherche agronomique

SOMMAIRE

L'influence d'apports d'engrais potassiques sur l'évolution de la prairie temporaire a été suivie de 1958 à 1966 dans un sol granitique de la Pierre-qui-Vire (Yonne). Différentes observations sur l'aptitude de ces sols, riches en minéraux potassiques, à libérer du potassium utilisable par les végétaux, sont présentées et discutées.

INTRODUCTION

Dans une note antérieure (1961), nous avions, après trois années de fertilisation potassique du dactyle exploité intensivement en régime de fauche, relaté certaines observations dont l'essentiel concernait l'efficacité des apports de potassium dans un sol granitique riche en minéraux potassiques, ainsi que l'apparition de symptômes de carence dans les parcelles témoins dès la première année d'expérimentation.

Le but de cette nouvelle note est de présenter les informations fournies par l'essai après neuf ans d'exploitation.

MÉTHODES ET CONDITIONS EXPÉRIMENTALES

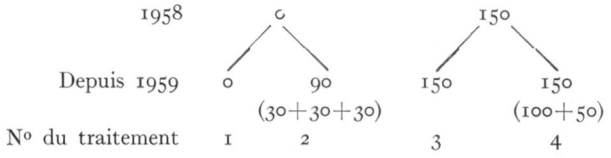
1. *Traitements*

En 1958, le dispositif expérimental (Blocs Fisher à 6 répétitions) ne comportait que deux traitements :

$K_2O = 0$

$K_2O = 150$ kg/ha en une seule application.

En 1959, les parcelles de chaque série furent subdivisées afin de permettre l'étude de doses et de fractionnement selon le schéma suivant :



Les applications en une fois ont eu lieu en hiver. Le fractionnement comportait un premier apport en hiver, un second à la première coupe et le cas échéant, un troisième à la deuxième coupe.

Afin de permettre une meilleure utilisation des résultats de cet essai exploité en fauche, le traitement n° 2 ($K_2O = 90$) a été établi pour tenir compte des restitutions théoriques d'un troupeau en pâture.

2. *Sol*

Le sol est formé à partir d'une arène granitique à base de microcline résultant de l'altération d'un granite à deux micas. Sa texture est grossière (40 p. 100 de cailloux et graviers, 13 p. 100 d'argile). Le taux de potassium total est élevé, mais le potassium échangeable et la capacité de fixation pour le potassium sont moyens. La composition physico-chimique est rappelée en annexe (1).

3. *Cultures*

1958 à 1961 : Dactyle Prairial,
1962 : Maïs sans apport de K, avec 45 tonnes de fumier par ha,
1963 à 1966 : Fétuque des prés S_{53} et trèfle blanc Ladino.

4. *Méthodes analytiques*

Capacités d'échange de cations et bases échangeables.

Échange à l'acétate d'ammonium à pH 7.

---

(1) *Composition physico-chimique du sol et du sous-sol*

	Sol (0-10 cm)	Sous-Sol (10-25 cm)
Cailloux et graviers p. 100	40	42
Granulométrie de la terre fine p. 100		
Sable grossier	60	61
Sable fin	9,5	7,5
Limon grossier	5	5,5
Limon fin	12,5	13
Argile	13	13
Analyse chimique		
Carbone p. 1 000	51,5	48,1
Azote p. 1 000	3,7	3,7
C/N	14	13
pH	5,1	5,2
Capacité d'échange (m.e/100 g)	15,2	14,9
Calcium échangeable (m.e/100 g)	5,5	5,2
Magnésium échangeable (m.e/100 g)	0,30	0,40
Potassium échangeable (m.e/100 g)	0,27	0,24
Sodium échangeable (m.e/100 g)	0,14	0,13
K total p. 100	4,1	
Capacité de fixation pour le potassium (VAN DER MAREL)		
— par voie humide p. 100	8,3	
— par voie sèche p. 100	35,1	

K_2O total (J. ORLIAC, 1961).

Attaque sulfo-fluorhydrique, et dosage de K par photométrie de flamme après élimination des éléments lourds (Fe_2O_3 et TiO_2 principalement) par l'ammoniaque.

Capacité de fixation pour le potassium (VAN DER MAREL, 1955).

Le sol est mis en contact, soit à l'état humide, soit à l'état sec avec une quantité connue de potassium pendant un temps déterminé ; on mesure par différence la proportion de potassium fixée par le sol.

RÉSULTATS

Pendant toute la durée de l'expérience, l'évolution de la teneur du sol et du sous-sol en potassium échangeable a été suivie grâce à des prélèvements annuels effectués avant la mise en place de l'essai, puis, immédiatement après chacune des dernières coupes. La mesure des rendements en matière sèche de chaque coupe a été complétée par la détermination des teneurs en potassium et en sodium du fourrage récolté. Les phénomènes visibles de carence potassique ont fait l'objet d'observations périodiques, de même que l'évolution de l'équilibre floristique du mélange graminée-légumineuse de la deuxième culture.

1. *Production de matière sèche*

Les figures 1 et 2 donnent pour chaque culture d'herbe les rendements annuels par coupe. Les rendements parcellaires annuels exprimés en pourcentage du témoin, sont présentés dans le tableau 1 ci-après :

TABLEAU 1

Rendements annuels indiciaires

	K_2O kg/ha	0	90	150	100 + 50
	1958	100		113	
Dactyle	1959	100	121	144	139
	1960	100	142	163	165
	1961	100	154	187	181
Fétuque-trèfle blanc	1964	100	111	116	117
	1965	100	122	137	143
	1966	100	131	137	148

2. *Teneur en potassium du fourrage*

L'évolution de la teneur en potassium exprimée en K p. 100 de matière sèche de la récolte est donnée pour chaque traitement et pour chaque cycle des deux cultures successives d'herbe par la figure 3. La chute régulière de la teneur en potassium des récoltes au cours du temps est interrompue par un apport de fumier appliqué sur le maïs de 1962, qui a relevé le taux de potassium échangeable du sol.

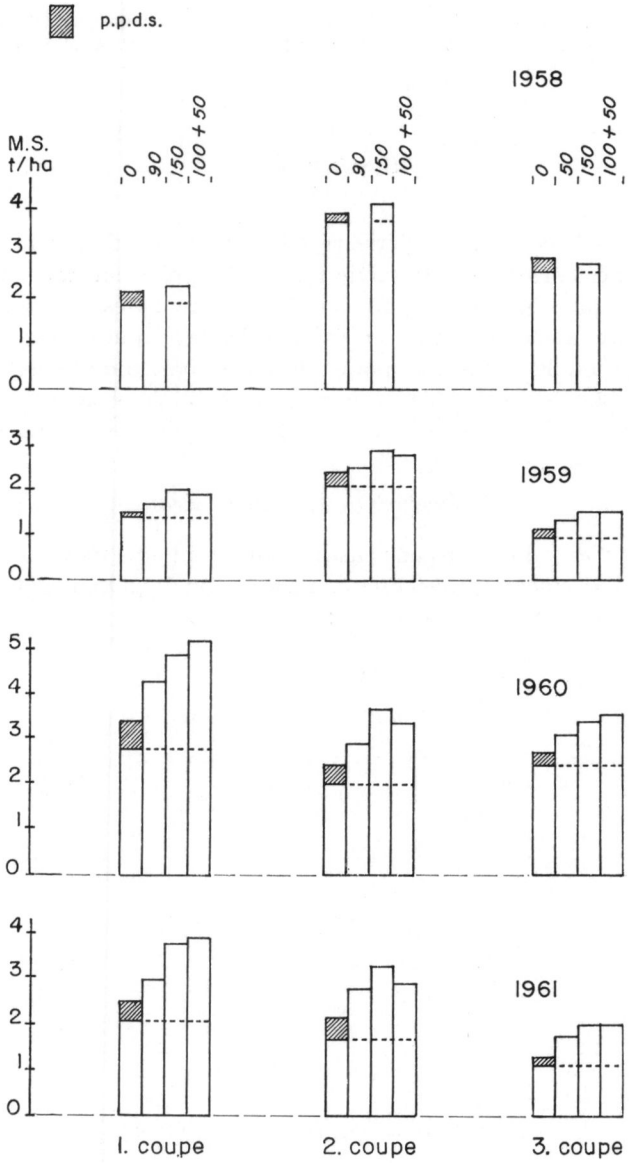


FIG. 1 : *Rendements du dactyle*

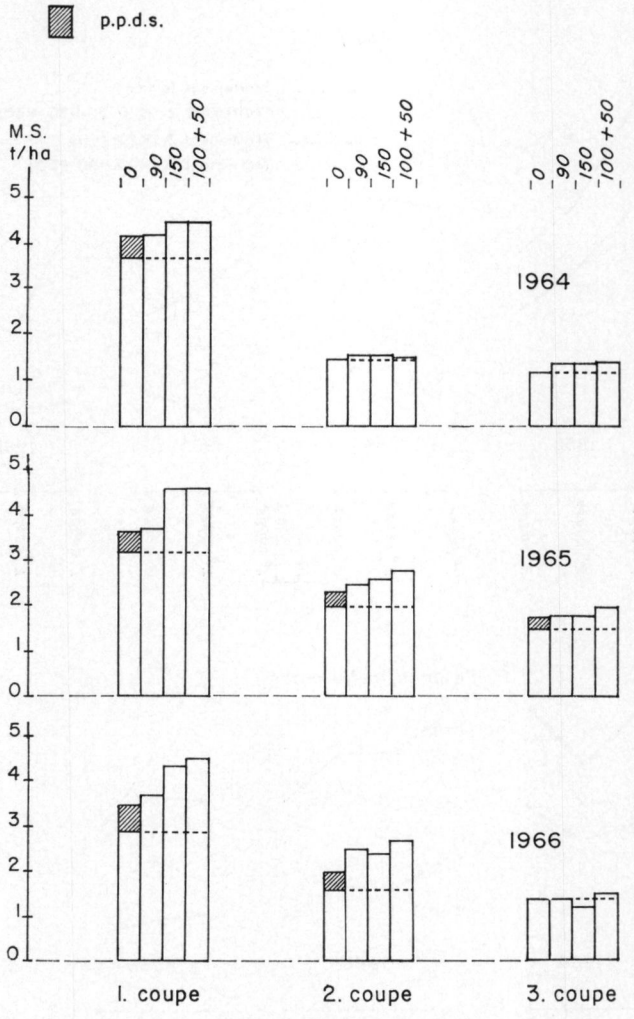


FIG. 2 : *Rendements de fétuque-trèfle*

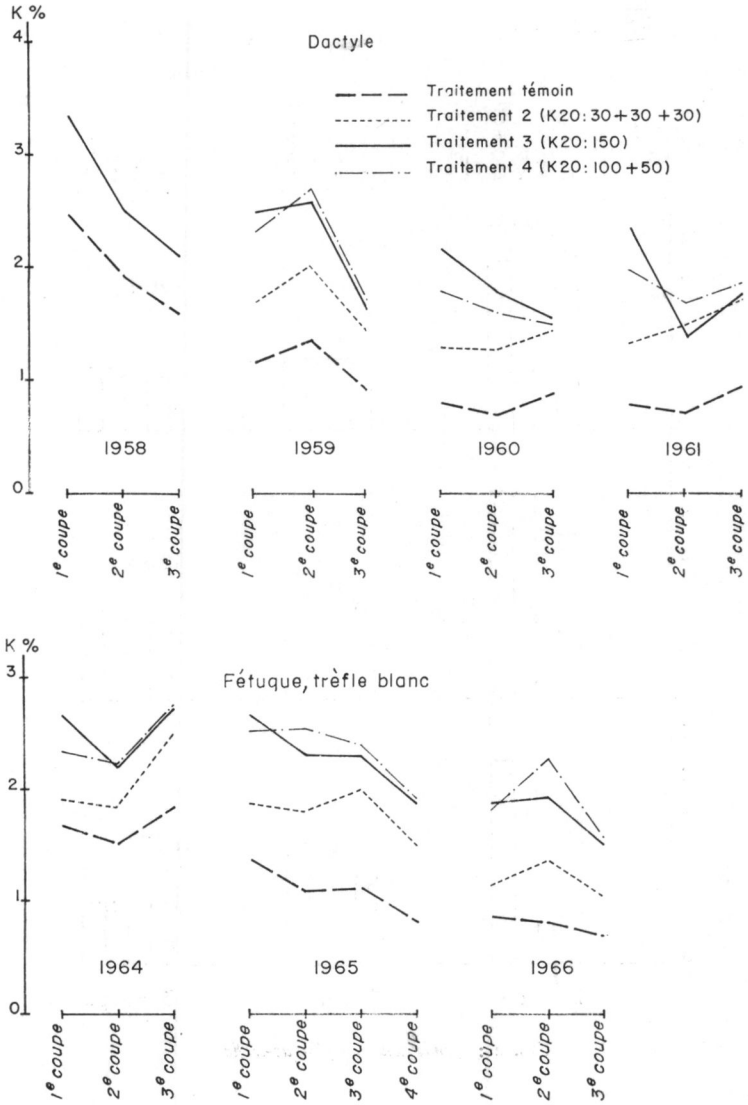


FIG. 3 : *Évolution des teneurs en potassium de la plante*

3. *Phénomènes de carence*

L'intensité des manifestations visuelles de carence potassique est indiquée, pour les années 1965 et 1966, dans le tableau 2 qui donne, pour chacune des parcelles mises en comparaison, le pourcentage de plantes manifestant des signes prononcés de carence au cours de la phase végétative active de chaque cycle.

TABLEAU 2

Pourcentage de plantes manifestant des signes prononcés de carence

Date	Cycle	Trèfle				Fétuque			
		0	90	150	100 + 50	0	90	150	100 + 50
1965									
22-5	1er	100	51	0	0	100	16	0	13
25-8	3e	100	9	0	0	100	21	0	0
7-9	3e	100	32	10	8	100	37	18	27
25-10	4e	100	43	7	7	100	24	5	4
1966									
12-5	1er	100	30	20	5	100	7	0	0
26-5	1er	100	52	0	1	100	20	0	0
28-6	2e	100	15	2	9	100	2	0	0

En relation avec le tableau 2 précédent, le tableau suivant (tabl. 3) indique les teneurs en potassium de la récolte au cours des années 1965 et 1966. La confrontation de ces deux tableaux permet de situer les seuils de carence potassique visible, dans les conditions de cette expérience.

TABLEAU 3

Teneur en K des plantes (p. 100 de matière sèche)

	0	90	150	100 + 50
1er cycle 1965	1,37	1,87	2,68	2,51
3e cycle	1,11	2,00	2,27	2,41
4e cycle	0,81	1,48	1,91	1,88
1er cycle 1966	0,87	1,14	1,89	1,83
2e cycle	0,82	1,38	1,93	2,26

(Les valeurs soulignées correspondent à des plantes n'ayant pas manifesté de symptôme de carence.)

4. *Bilan du potassium dans le sol*

Le tableau 4 présente le bilan du potassium dans le sol sur neuf ans, pour chacun des quatre traitements expérimentés.

TABLEAU 4

Bilan du potassium dans le sol

	0	90	150	100 + 50
Exportations	919	1 350	1 921	1 877
Apports (engrais + fumier)	157	727 (1)	1 357	1 307 (1)
Fourniture totale du sol	762	623	564	570
Abaissement de K_2O échangeable (sur 25 cm)	156	120	144	114
K_2O provenant des réserves	606	503	420	456

(1) Par suite de la mise en place du mélange fétuque-trèfle blanc en 1963, seules les premières applications d'engrais potassiques ont été faites, ce qui fait une différence de 60 kg dans le traitement 90 (30 + 30 + 30)et de 50 kg dans le traitement 100 + 50.

DISCUSSION

1. *Rendements culturaux*

L'examen des rendements culturaux parcellaires donnés par les figures 1 et 2 ainsi que par le tableau 1, permet de faire les commentaires suivants :

1° L'accroissement de rendement des parcelles fertilisées en K par rapport aux parcelles témoins s'élève au cours des années pour chacune des cultures de plantes fourragères ; par contre, la culture de maïs de 1962, précédée d'un apport de fumier, a eu pour conséquence un certain nivellement des écarts entre les rendements des différentes parcelles de la culture suivante ;

2° en éliminant les années de sécheresse (1959 et 1964) on observe une baisse régulière de la production annuelle du témoin, production qui a toutefois marqué un redressement après la culture du maïs en 1962, ainsi qu'il ressort du tableau suivant :

	Dactyle			Fétuque-trèfle	
Année	1958	1960	1961	1965	1966
Témoin (t/ha)	8,17	7,28	4,90	7,26	5,84

3° le fractionnement de la dose 150 n'entraîne pas de modification du rendement annuel, ni du rendement par coupe, à une exception près.

2. *Composition minérale du végétal*

1° *Évolution dans le temps*

L'évolution au cours du temps de la teneur en potassium des récoltes présente deux phases distinctes (fig. 3) correspondant à chacune des deux cultures successives d'herbe. Cette évolution se traduit par une diminution importante et régulière du taux de potassium dans la plante au cours du temps pour les deux cultures. Cependant, l'apport de fumier sur le maïs intercalé entre le dactyle et l'association fétuque-trèfle blanc a eu pour effet de relever le taux de potassium du fourrage en 1964, de même qu'il avait remonté la production.

Bien que les végétaux n'aient pas obligatoirement été récoltés chaque année aux mêmes stades physiologiques, ce qui rend délicates les comparaisons de leurs teneurs en potassium (REBISCHUNG, 1963), la diminution progressive de ce taux dans les *parcelles témoins* peut, avec de fortes probabilités, être attribuée à des difficultés croissantes d'approvisionnement en potassium à partir du sol, ainsi que le montrent les valeurs suivantes (exprimées en K p. 100 de matière sèche) :

	1958	*1959*	*1960*	*1961*
Dactyle :				
1e coupe	2,52	1,19	0,82	0,79
2e coupe	1,93	1,38	0,73	0,73
3e coupe	1,66	0,92	0,89	0,94
	1964	*1965*	*1966*	
Fétuque-trèfle blanc :				
1e coupe	1,66	1,37	0,87	
2e coupe	1,52	1,10	0,82	
3e coupe	1,84	0,81	0,68	

Dans les *parcelles fertilisées*, le niveau du potassium dans la plante à la récolte est nettement plus élevé que dans le cas des parcelles ne recevant aucun apport potassique. Cependant, bien que les variations annuelles soient inférieures à celles observées dans les témoins, la diminution au cours du temps du taux de potassium des récoltes est encore très importante pour les deux doses d'application de la potasse, ce qui montre que la dose maximum apportée dans cet essai (150 kg K_2O/ha) est insuffisante pour compenser les pertes du sol dues aux prélèvements des cultures.

2° *Influence du fractionnement.*

Un des rôles du fractionnement consiste à diminuer la teneur en potassium de la plante à la 1ere coupe, celle-ci n'ayant alors à sa disposition qu'une dose modérée de cations K^+. C'est ce qui ressort des valeurs suivantes qui donnent le taux de potassium à la 1ere récolte (en K p. 100 de matière sèche) :

N° du traitement	*1959*	*1960*	*1961*	*1964*	*1965*	*1966*
3	2,51	2,18	2,34	2,64	2,68	1,89
4	2,31	1,83	1,98	2,34	2,51	1,83

3° *Corrélation entre la teneur en potassium de la plante et le rendement.*

L'étude des doses des traitements 1, 2 et 3 a toujours montré que l'accroissement du taux de K dans la plante était accompagné d'une augmentation de rendement, ce qui montre que nous n'avons jamais atteint la consommation de luxe.

Ceci est confirmé par la corrélation obtenue à l'aide des 82 couples de résultats dont nous disposons entre la teneur en K du fourrage et la production de matière sèche. Cette corrélation significative se traduit par une droite de régression d'équation:

$$Y = 1{,}44 + 0{,}13\ X$$

où Y = K p. 100 de matière sèche du fourrage
X = rendement en matière sèche en tonnes par hectare.

3. *Phénomènes de carence*

1° *Symptômes.*

Ils se sont manifestés dès la première année de l'essai dans les parcelles témoins du dactyle sous l'aspect de nécroses terminales des limbes, s'amplifiant au cours des années.

Sur fétuque, les symptômes étaient semblables tandis que sur trèfle blanc, ils se présentaient en ponctuations blanches caractéristiques.

En 1965 et 1966, des mesures sur le nombre de plantes atteintes ont donné les résultats présentés dans le tableau 2 qui fait apparaître l'intensité relative de la carence potassique des plantes des différents traitements par rapport à celles du témoin, ces dernières manifestant toutes des symptômes de carence.

Il découle de ces valeurs que les symptômes de carence sur trèfle sont plus nombreux que sur fétuque pour le traitement 90 kg de K_2O : 50 p. 100 des trèfles peuvent être atteints au 1er cycle alors que l'apport de K_2O n'a été que de 30 kg. Pour le traitement 150, ces symptômes sont dans l'ensemble assez rares, mais ils se présentent parfois avec une fréquence de 20 p. 100 du témoin.

2° *Seuils de carence.*

a) *Teneur en K de la plante.*

Nous ne pouvons donner que la teneur en K des plantes (fétuque + trèfle) représentant l'ensemble d'une parcelle : dans le cas des témoins, toutes les plantes extériorisent des symptômes de carence, alors que, pour les autres traitements, seule une partie de celles-ci est atteinte.

En relation avec le tableau 2, l'examen du tableau 3 indiquant ces valeurs pour les cycles ayant donné lieu aux comptages, permet de situer les seuils de carence visibles en fonction du taux de potassium des végétaux (mélange fétuque-trèfle blanc, les deux espèces n'étant pas séparées à l'analyse). Il apparaît que dans le témoin où les plantes manifestent toutes des symptômes de carence, la teneur en K de la plante est au maximum égale à 1,37 p. 100. Les plantes non carencées se caractérisent par un taux de K supérieur à 1,93 p. 100 (valeurs soulignées). Les plantes du traitement 90 partiellement carencées se situent approximativement entre ces deux limites, avec un certain chevauchement.

Ces données sont différentes de celles citées par un certain nombre d'auteurs, en particulier par WALSH et *al* (1958), fixant le seuil de carence à 0,40 p. 100 pour le

dactyle et 0,80 p. 100 pour le trèfle blanc Ladino et le seuil de consommation de luxe respectivement à 1,8 et 2,0 p. 100 pour ces deux espèces. Or, nous avons montré que l'accroissement de K de la plante s'accompagnait d'une augmentation du rendement.

b) *Teneur en K_2O du sol.*

Les teneurs en K_2O échangeable du sol dans les différentes parcelles pour les cycles considérés sont (en p. 1 000) :

	0	90	150	100 + 50
Automne 1964	0,12	0,22	0,22	0,25
Automne 1965	0,08	0,10	0,15	0,13
Automne 1966	0,06	0,09	0,14	0,15

D'après les valeurs obtenues dans les parcelles témoins, il est possible de fixer le seuil de carence généralisée à 0,12 p. 1 000. Toutefois, dans les autres traitements, les taux de K_2O échangeable présentent une dispersion relativement importante, puisque dans les traitements 150 ou 100 + 50 pour lesquels on n'observe que des carences modérées et partielles, la teneur du sol fluctue entre 0,13 et 0,25 p. 1 000. Il convient de noter que les dosages ont été effectués sur des prélèvements faits en automne, et que les symptômes de carence ont été observés au cours de la saison de végétation ; il n'y a donc pas lieu d'attendre une corrélation nette entre l'intensité de la carence et la teneur du sol en K_2O échangeable. Toutefois, la fluctuation des valeurs obtenues est trop importante pour que l'on puisse valablement utiliser le potassium échangeable en vue d'évaluer de façon précise les potentialités alimentaires de ce type de sol.

4. *Répercussion des apports de potassium sur la répartition trèfle-fétuque*

Il est bien connu que l'apport de potassium favorise le développement de la légumineuse par rapport à la graminée, cette dernière absorbant préférentiellement le potassium en raison de la faible capacité d'échange de cations de ses racines (Doll et *al.*, 1959 ; Kiyoshi Yoshiwara, 1963; Walsh, 1963).

Des comptages effectués en 1965 et 1966 ont montré l'équilibre suivant (en pourcentage de couverture du trèfle) qui confirme l'influence du potassium.

	0	90	150	100 + 50
1965 (%)	25 à 35	35 à 50	45 à 60	30 à 50
1966 (%)	35 à 40	50 à 65	65 à 70	50 à 60

5. *Bilan du potassium dans le sol*

Ainsi que le montre le tableau 4 qui représente les éléments du bilan du potassium dans le sol pour chacun des quatre traitements, on observe dans tous les cas une fourniture du sol importante, surtout marquée pour le témoin, mais qui ne réprésente qu'environ 0,5 p. 100 du stock total. L'abaissement du taux de potassium échangeable montre que la libération de cet élément à partir des réserves est assez lente, ce qui est normal compte-tenu de l'abondance du microcline, minéral résistant à l'altération.

CONCLUSIONS

Cet essai de longue durée sur la fertilisation potassique des plantes fourragères conduit à deux séries de conclusions :

— sur un plan pratique, les résultats obtenus montrent que, malgré sa richesse en potassium total et malgré son taux moyen de potassium échangeable, ce sol se comporte à l'égard des plantes fourragères comme un sol pauvre, peu apte à rétablir rapidement son niveau échangeable en raison notamment de la résitance du microcline à l'altération : en effet, l'apparition des symptômes de carence est généralisée dès la première année dans les parcelles témoins tant sur graminées que sur légumineuses ; de plus, ces symptômes peuvent encore se rencontrer dans les parcelles fertilisées à la dose maximum. Le traitement établi pour tenir compte de la restitution possible par les animaux se montre loin de satisfaire aux exigences d'une production intensive. Par contre, un apport normal de fumier permet de compenser approximativement les besoins d'une année de culture. On observe aussi une baisse régulière du potassium échangeable du sol, principalement dans les parcelles témoins, qui se traduit par une diminution progressive au cours du temps de la teneur en potassium de la plante.

— Sur un plan plus général, cet essai met en évidence la difficulté d'utiliser efficacement certains résultats analytiques concernant le sol, en particulier le potassium échangeable ; en effet, bien que les prélèvements de terre aient toujours été effectués à des profondeurs identiques, le taux de potassium échangeable fluctue d'une année à l'autre pour un même traitement. Il n'est donc pas toujours possible de pronostiquer une carence d'après cette détermination.

Reçu pour publication en juin 1968.

SUMMARY

FRESH DATA ON POTASSIC FERTILIZING OF FORAGE PLANTS IN GRANITIC SOILS

The effects of potassium fertilizing on the development of temporary grass-land has been investigated in a granitic soil of the Morvan, in France. This soil exhibits a high content of potassic minerals, chiefly microcline, and also a content of exchangeable potassium which, allowing for its particle-size features, categorizes it as a soil with a moderate content of that element. Yet, the results obtained show that its behaviour with respect to plants is that of a lean soil, ill-suited for reinstating quickly its exchangeable level. These results also highlight the problem of using exchangeable potassium as a means of assessing the availability of potassium in the soil.

ZUSAMMENFASSUNG

NEUE ANGABEN ÜBER DIE KALIDÜNGUNG DER FUTTERPFLANZEN IN GRANITISCHEN BÖDEN

Die Einwirkung von Kalizugaben auf die Evolution der Wechselwiese wurde in einem granitischen Boden des französischen Gebietes « Morvan » untersucht. Dieser Boden weist bedeutende Lager an Kalimineralien, hauptsächlich unter der Form von Mikrokline, auf, sowie einen Gehalt an austauschbarem Kalium, das, mit Rücksicht auf seine Kornas-grösseneigenschaften, seine Einordnung in die Klasse der mit diesem Element mittelmässig versorgten Böden zulässt. Die erhaltenen Ergebnisse zeigen jedoch, dass dieser Boden gegenüber Pflanzen sich wie ein armer Boden verhält, der wenig fähig ist, sein austauschbares Niveau wiederherzustellen. Sie unterstreichen die Schwierigkeit, den Gehalt an austauschbarem Kalium als Diagnostikmittel für die Verfügbarkeit von Kalium im Boden zu benutzen.

РЕЗЮМЕ

Новые данные о калиевом удобрении кормовых растений на гранитных почвах.

СЮЗАННА МЭРИО, А. ЛИБУА, РУФЬ ГРОСМАН.

Авторы изучали влияние калиевых удобрений на эволюцию временных лугов, на гранитной почве провинции Морван. Почва эта заключает крупные запасы калиевых минералов, главным образом в виде микроклина, и содержание в ней обменного калия относит ее, в зависимости от характера ее гранулометрии, к категории почв средне обеспеченных этим элементом. Полученные результаты показывают, однако, что поведение ее в отношении растительности носит характер поведения почвы небогатой, неспособной к быстрому восстановлению своего обменного уровня; они демонстрируют трудность использования процентного содержания обменного калия в почве, в качестве средства диагностики наличности этого элемента в ней.

REMERCIEMENTS

Nous exprimons toute notre gratitude à Dom Anschaire Menesson, Directeur de la Ferme de l'Abbaye de la Pierre-qui-Vire, qui a bien voulu nous aider à réaliser cet essai.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Doll E. C., Hattfield A. L., Todd J. R., 1959. Influence des doses et de la fréquence des fumures potassiques sur la productivité des paturages et l'absorption du potassium. *Agron. J.*, **51**, 1, 27-29.

Gouny P., Meriaux S., Grosman R., 1961. Observations sur la fertilisation potassique du dactyle. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, 622-628.

Kiyoschi Yoshiwara, 1963. Fertilisation potassique d'association légumineuses-graminées. *Rev. Potasse.* Section 30, 19e suite.

Orliac J., 1961. *Méthode d'analyse chimique des roches.* Laboratoire de géologie et Minéralogie. Faculté des Sciences de Clermont-Ferrand. Série documentation, nº 19.

Rebischung J., 1963. The influence of K. levels in soils on the growth of various pastures species. Potassium in relation to grassland production. *Proc. first regional Conf. internation. Potash Inst.* Wetford (Ireland), 35-42.

Schuffelen A. C., Van der Marel H. W., 1955. Potassium fixation in soils. *Potassium Symp.*, 157-201.

Walsh T., Kilroy J., Mc Donnell P. M., 1958. Quelques aspects de la fumure potassique des paturages. *Rev. Potasse*, Section 30, 9e suite.

Walsh T., 1963. Recherches sur le rôle du potassium dans l'agriculture en Irlande. *Rev. Potasse*, Section 16, 27e suite.

Ann. agron., 1968, **19** (4), 473-496.

INOCULATION DE LÉGUMINEUSES A MADAGASCAR

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

J. DÉNARIÉ

avec la collaboration technique de S. ANDRIAMANANTENA et J. RAMONJY

Station de Recherches de Microbiologie des Sols,
Centre de Recherches agronomiques du Centre-Est, 21 - Dijon
Institut national de la Recherche agronomique

Division de Phytopathologie,
Institut de Recherches agronomiques à Madagascar

SOMMAIRE

Des essais en plein champ d'inoculation de graines de Légumineuses à l'aide de *Rhizobium* spécifiques ont été réalisés à Madagascar. L'expérimentation a porté essentiellement sur des variétés d'arachide, de haricot, de soja et de cultures fourragères. Les essais ont été effectués pendant la saison des pluies et pendant la saison sèche sur divers types de sol caractéristiques. L'inoculation a un effet particulièrement net sur le soja quel que soit le type de sol, et pour le haricot et l'arachide sur sols sableux pauvres en matière organique.

INTRODUCTION

Dans les sols tropicaux et arides, généralement pauvres en matière organique, l'azote est un facteur limitant essentiel de la production agricole ; en outre il s'avère être l'élément le plus coûteux : on conçoit donc l'intérêt que peut présenter la culture des Légumineuses pour les pays en voie de développement (WHYTE, NILLSON-LEISSNER et TRUMBLE, 1953 ; HENZELL et NORRIS, 1962). En outre, selon DONALD (1965), l'utilisation de pâturages de Légumineuses fertilisés a été le facteur essentiel de l'évolution favorable de sols australiens, depuis leur première mise en culture. Cependant, l'introduction de Légumineuses sur des sols de défriche s'avère souvent difficile à cause de l'absence de *Rhizobium* convenables (DAWSON, 1962).

Depuis plus de trente ans, on procède, dans certains pays tempérés, à l'inoculation des graines de Légumineuses à l'aide de *Rhizobium* spécifiques, essentiellement

pour le soja, la luzerne et le trèfle. Les études concernant l'inoculation et l'extension de cette pratique à des zones arides ou tropicales sont plus récentes. En Australie ces recherches sont maintenant très avancées et le « Queensland Department of Agriculture », en association avec la Division des Pâturages Tropicaux du C. S. I. R. O., a sélectionné des souches infectieuses pour la plupart des Légumineuses fourragères tropicales. En Afrique, contrastant avec le grand nombre de publications sur la nutrition minérale des Légumineuses et l'influence de l'environnement sur la nodulation, les travaux consacrés à l'inoculation des graines avec *Rhizobium* sont peu nombreux, malgré l'importance économique du problème (MASEFIELD, 1958 ; DAWSON, 1962). En 1952, BOSSER et DOMMERGUES ont réalisé à Madagascar un essai sur une Légumineuse fourragère tempérée, *Medicago lupulina*, obtenant un accroissement de la production de fourrage sec. BONNIER (1957 et 1958) a obtenu des augmentations de rendement très nettes sur soja et arachide au Congo. Au Kenya, BUMPUS (1957 et 1960) obtient des résultats positifs sur trèfle, luzerne, lupin et deux Légumineuses tropicales, quand il apporte également une fumure phosphatée.

En Israël, SCHIFFMAN (1960, communication personnelle), signale l'augmentation spectaculaire des rendements de l'arachide provoquée par l'inoculation. Au Nigéria par contre, EZEDINMA (1964) et TEWARI (1965) estiment que les *Rhizobium* spécifiques de *Vigna sinensis* sont largement répandus dans les sols.

A Madagascar, l'augmentation de la production agricole implique entre autres facteurs :

— une augmentation de la superficie des terres cultivées par la mise en valeur des sols ferrallitiques des Plateaux souvent particulièrement dégradés à la suite du lessivage et de la pratique du brûlis, et des sables roux du Sud et de l'Ouest ;

— un accroissement du temps de culture sur des terres déjà cultivées, où l'eau n'est pas un facteur limitant pendant la saison sèche : culture d'inter-saison sur rizières.

Dans les deux cas, la culture des Légumineuses améliorerait le bilan azoté du sol, que ce soit dans un assolement pluri-annuel sur colline ou dans une double culture annuelle sur rizière. Mais en pratique l'introduction de certaines Légumineuses s'est avérée difficile sur colline défrichée et sur rizière. L'examen des racines, en première année de culture, montre que les nodosités sont en général peu nombreuses surtout pour les Légumineuses tempérées (haricot, pois, vesce), le soja et l'arachide.

On peut donc penser que ces sols qui n'ont pas porté au préalable de culture de Légumineuses ne contiennent pas en quantité suffisante les *Rhizobium* spécifiques.

Le problème de la mise en culture concerne des types de sol variés. Or il n'existe pas, à notre connaissance, d'étude sur la répartition naturelle des *Rhizobium* des divers groupes d'inoculation en fonction des types pédologiques et des caractères physico-chimiques des sols.

Nous avons donc entrepris une série d'isolements de souches locales de *Rhizobium* à partir de nodosités de Légumineuses tempérées et tropicales et procédé à une série d'essais d'inoculation en plein champ, afin d'essayer de déterminer pour quelles plantes cultivées et dans quels types de sols l'absence de *Rhizobium* spécifiques constitue un facteur limitant la nodulation, et dans quelle mesure l'apport de *Rhizobium* peut entraîner une amélioration de la nutrition azotée et donc, si les autres conditions de culture sont convenables, une augmentation de rendement.

I. — MATÉRIEL UTILISÉ ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

1. *Matériel végétal*

Nous nous sommes limités dans un premier temps, par souci d'efficacité pratique, à l'étude des Légumineuses d'importance économique dont la culture en première année de défriche sur colline, ou en contre-saison sur rizière, présentait des difficultés.

Aussi nos essais ont surtout porté sur les plantes suivantes :

cultures de saison des pluies sur colline :

— *Arachis hypogaea* (Arachide),
— *Glycine max* (soja, variétés vivrières et fourragères),
— *Phaseolus vulgaris* (haricot),
— *Pisum sativum* (pois) ;

cultures de saison sèche sur rizière :

— *Glycine max* (soja, variété *fourragère*),
— *Phaseolus vulgaris* (haricot),
— *Pisum sativum* (pois),
— *Vicia sativa* (vesce).

2. *Matériel bactérien*

Les souches locales de *Rhizobium* ont été isolées par la technique décrite par BONNIER (1957). Soixante deux souches ont été isolées à partir de 8 espèces de Légumineuses tempérées : *Lathyrus tingitanus* (une souche), *Lupinus albus* (2), *Medicago sativa* (3), *Melilotus albus* (3), *Phaseolus vulgaris* (10), *Pisum sativum* (9), *Trifolium repens* (3), *Vicia sativa* (5), et de 12 espèces de Légumineuses tropicales : *Acacia dealbata* (1), *Calopogonium* sp. (1), *Desmodium intortum* (3), *Glycine max* (10), *Lablab niger* (1), *Phaseolus aureus* (1), *Phaseolus acutifolius* (1), *Phaseolus atropurpureus* (1), *Phaseolus lunatus* (1), *Sesbania* sp. (2), *Vigna sinensis* (2) et *Voandzeia subterranea* (2).

Nous avons également utilisé des souches provenant de deux autres laboratoires : deux souches spécifiques d'*Arachis hypogaea* fournies aimablement par M. J. SCHIFFMANN du Centre de Recherches agronomiques de Bet Dagone (Israël) et deux souches spécifiques d'*Arachis hypogaea* et *Stylosanthes gracilis* fournies par le Professeur C. BONNIER de l'Institut agronomique de Gembloux (Belgique).

Pour l'inoculation, les souches sont cultivées au laboratoire en milieu liquide sur un agitateur rotatif ; la culture est ensuite mélangée à un support poudreux (Terre d'infusoire lavée, Prolabo), préalablement stérilisé à l'autoclave, où la survie des bactéries est bonne pendant au moins trois mois à la température du laboratoire (OBATON et BLACHÈRE, 1965). Au moment du semis, la poudre, humidifiée, est mélangée soit directement avec les graines, soit à de la balle de riz placée à côté des graines dans les poquets, suivant la technique conseillée par BONNIER (1960). Pour les sols acides, les graines de Légumineuses tempérées (haricot et pois) sont pralinées avec de la dolomie avant l'inoculation (LONERAGAN et *al.*, 1955).

Les symboles S_1, S_2 et S_3 représentent suivant les plantes : les mélanges H_1 et H_2 pour le haricot, So_1 et So_2 pour le soja, et A_1, A_2, A_3 pour l'arachide.

Pour tous les essais, sauf ceux portant sur l'arachide, les mélanges sont constitués de souches spécifiques de la Légumineuse inoculée. Par contre, pour les essais « Arachide » un des 3 mélanges utilisés, le mélange A_3, est constitué de *Rhizobium* isolés de *Vigna sinensis*, *Lupinus albus* et *Desmodium intortum*.

3. *Fumures*

Sur les divers terrains utilisés, on a apporté, sur toute la surface des essais, la fumure de redressement préconisée par l'I. R. A. M. après diagnostic des carences minérales (VELLY, CELTON et ROCHE, 1966 ; CELTON, VELLY et ROCHE, 1966). Les principaux éléments ont été apportés sous les formes suivantes : Hyper Reno (P_2O_5), Chlorure de potasse (K_2O), Dolomie (MgO et CaO)et Nutramine (Oligo-éléments). Le détail des quantités d'engrais pour chaque point d'essai est donné dans les tableaux 2 et 3. Avec une telle fumure, on peut considérer que l'azote est le facteur limitant majeur pour la nutrition minérale des plantes cultivées.

Par ailleurs, un insecticide (aldripoudre 5 p. 100) a été apporté au sol à la dose de 100 kg/ha ; des expériences préalables au laboratoire avaient montré la non-toxicité de ce produit sur diverses souches de *Rhizobium* aux concentrations utilisées ; ce résultat est en accord avec les observations de VINCENT (1958).

4. *Dispositifs expérimentaux*

Deux types de dispositif ont été utilisés :

1° des tests comportant 2 traitements (avec et sans inoculation) et 2 répétitions ;
2° des essais blocs à répartition au hasard comportant 6 répétitions et 4 ou 5 traitements suivant les cas :

1. témoin
2. apport de 60 kg/ha d'azote, sous forme d'urée
3. inoculation avec mélange de souches S_1
4. inoculation avec mélange de souches S_2
5. éventuellement avec un mélange de souches S_3

5. *Mesures effectuées*

Les analyses physico-chimiques des sols ont été faites au laboratoire de Chimie de la Division d'Agrologie de l'I. R. A. M. à Tananarive.

Un mois environ après le semis, le pourcentage de pieds levés a été déterminé. Au moment de la floraison des dénombrements de nodules ont été effectués distinguant la taille des nodosités, dans certains cas leur coloration, et enfin leur position sur les racines à plus ou moins grande profondeur. Pour les cultures vivrières, les mesures de rendement ont porté sur les graines et parfois sur le poids sec des résidus de récoltes ; dans le cas de cultures fourragères, on a déterminé le poids frais des parties aériennes et la teneur en azote du matériel séché.

Les résultats ont été soumis à l'analyse statistique : analyse de variance pour les essais blocs, analyse couple pour les dénombrements de nodules des tests.

Pour les numérations de nodules, les nombres donnés dans les tableaux indiquent une valeur moyenne par pied portant sur un échantillon de 24 plantes ; on pourra ainsi comparer facilement les diverses plantes et les divers essais entre eux. Les rendements des traitements sont indiqués en pourcentage par rapport au rendement du témoin (donné en kg/ha), dans le but de faciliter la comparaison des effets de divers traitements.

6. *Description des points d'essai*

a) *Essais de saison des pluies.*

Les points d'essais étaient répartis de la façon suivante : un dans le Nord de l'Ile (Anketrakabe), quatre dans le Sud (Anbovombe, Ankazoabo, Ihosy et Taheza), six sur les Hauts-Plateaux (Ampangabe, Ambohimandroso, Betafo, Lac Alaotra, Kianjasoa, et La Sakay). Les données climatiques obtenues aux environs de ces divers points d'essai sont reproduites dans le tableau 1.

TABLEAU I

Données climatiques relevées dans les environs des points d'essai

Points de relevé	Points d'essai	Altitude	Pluviométrie (en m/m)	Températures (degrés centigrades)		
				Max.	Min.	Moyenne
Nord						
Ambahivahibe	Anketrakabe	370	1 349	28,7	19,1	23,9
Hauts Plateaux						
Tananarive	Ampangabe	1 310	1 263	23,8	12,6	18,2
Sakay	La Sakay	940	1 574	29,7	14,2	22,0
Kianjasoa	Kianjasoa	1 000	1 500			
Ambohitsilaozana	Alaotra	786	1 148	26,8	14,5	20,7
Betafo	Betafo		1 426			
Sud						
Ambovombe	Ambovombe	135	576	29,2	17,1	23,1
Ankazoabo	Ankazoabo	428	721	32,1	16,9	24,5
Ihosy	Ihosy	700	786	27,9	15,6	21,7

TABLEAU 2

Caractères analytiques des sols et fumures pour les essais de saison des pluies

Classe des Sols	Sols ferrallitiques						Sols fersiallitiques			
Localités	Ambohi-mandroso	Ampangabe	Ambatobe	Sakay	Aloatra	Anketra-kabe	Ankazoabo	Ihosy	Taheza	Ambovombe
Niveau de saturation.....	élevé	moyen	moyen	moyen	faible	faible				
pH	4,6	4,9	4,0	4,6	6,2	4,8	5,8	4,5	6,5	
Sable (%)	17,5	52,3	54,1	46,7	38	15,2	76,7	66,9	86,3	
Limon (%)	38,5	7,5	11,0	19,5	23	22,0	8,0	9,0	1	
Argile (%)	37,5	34,5	30,0	30,5	39	57,0	13,0	20,0	10	
Matière organique (%)	5,42	3,71	2,33	2,12	4,12	4,0	1,2	2,6	1,59	
Rapport C/N	16,02	15,8	13,5	11,6	12,4	11,2	10,4	19,1	11,5	
Somme des bases échangeables m. e. (%)	0,8	2,03	1,38	1,84	10	9,5	3,76	3,5	2,01	
Capacité d'échange m. e. (%) .	12,6	5,0	3,60	5,2	18	20,4	3,40	5,8	5,20	
P_2O_5 (1).....	560	400		300	100	100	100	100	100	100
K_2O	350	300		200	100				100	
Dolomie.....	2 000	2 000		2 000					500	
Oligo-éléments (Nutramine)....				10		10			10	10

(1) Les nombres correspondent à des kg/ha ; ils représentent des unités fertilisantes exprimées en K_2O et P_2O_5 pour P et K, et des poids d'engrais pour Ca et Mg (Dolomie) et pour les oligo-éléments (Nutramine).

Les essais réalisés dans le Sud portaient sur des sols ferrugineux tropicaux sableux, humifères (Ihosy) ou non humifères (Ambovombe, Ankazoabo et Taheza). A l'exception de l'essai mis en place à Betafo sur sol colluvial, tous les essais effectués dans le Nord et sur les Plateaux portaient sur des sols argileux ferrallitiques, fortement désaturé humique (Ambohimandro), moyennement désaturés (Ampangabe et Sakay) et faiblement désaturés (Alaotra et Anketrakabe).

Les caractéristiques physico-chimiques des sols sont données dans le tableau 2.

Les essais ont été mis en place le plus souvent sur des terrains de défriche (essais affectés dans le texte de l'indice *d*) n'ayant pas reçu antérieurement de fumure organique : on peut considérer ces conditions comme étant les plus défavorables à l'établissement des Légumineuses. Par contre deux essais ont été effectués sur des sols ayant déjà subi des cultures de Légumineuses : Lac Alaotra et Betafo ; les essais d'Ambohimandroso, enfin, ont été faits sur une défriche de Légumineuses (*Acacia dealbata*), sol riche en matière organique et en azote.

b) *Expérimentation sur sols de rizière.*

Ces essais ont été effectués sur les Hauts-Plateaux (environs de Tananarive et Station du Lac Alaotra), pendant la saison sèche à l'exception d'un essai réalisé à Belanitra pendant la saison des pluies.

TABLEAU 3

Caractères analytiques, fumures et types d'expérimentation pour les points d'essai sur sols de rizière

Points d'essai	Mahitsy (Tananarive)	Manjakandriana (Tananarive)	Andramasina (Tananarive)	Belanitra (Tananarive)	Ambatofotsy (Tananarive)
Type de sol	Humifère à gley	Humifère à gley	Argileux tacheté		Alluvions
pH	4,6	4,7	5,0	4,5	5,0
Sable (%)	42,1	63	34	14	56,5
Limon (%)	24,5	9,5	25	35,0	21,0
Argile (%)	24	18	37	45,5	19,5
Mat. organ. (%)	7,6	8,29	3,31	4,45	1,97
Rapport C/N	11,8	15,8	12,0	12,65	10,0
Somme des bases échangeables m. e. (%)	2,1	1,53	1,86	5,82	3,80
Capacité d'échange m. e. (%)	12,8	11,2	11,4	12,8	6,2
Apports d'engrais pour les cultures de contre-saison					
P_2O_5		80	80		80
K_2O		90	90		90
N		30	30		30
Types d'essais	Bloc : vesce, pois, soja, arrière-action riz	test soja	test soja	test soja vesce *Vigna*	test soja

Les points d'essais utilisés se répartissent sur trois types de sols de rizière : sols hydromorphes moyennement organiques (Mahitsy et Manjakandriana), sols hydromorphes minéraux (Andramasina et Belanitra) et sols évolués hydromorphes sur alluvions récentes (Ambatofotsy et Station du Lac Alaotra). Les caractères analytiques de ces sols sont donnés dans le tableau 3.

Ces essais avaient pour but de déterminer les effets de l'inoculation sur la nodulation et la croissance des Légumineuses ; en outre, à Mahitsy un essai a été mis en place pour étudier l'effet de l'enfouissement de Légumineuses sur le rendement du riz.

II. — RÉSULTATS

1. *Cultures de saison des pluies*

a) *Sols ferrallitiques.*

Sol moyennement désaturé sur gneiss : point d'essai d'Ampangabe (tabl. 4).

L'inoculation entraîne un manque à la levée pour l'arachide. Des observations ont été réalisées pour essayer de déterminer la cause de ces mauvaises levées : elles conduisent à émettre l'hypothèse que la pourriture des graines a été provoquée par des champignons qui ont dû proliférer à proximité des semences à cause des résidus de composés organiques encore présents dans le milieu ayant servi à la culture des *Rhizobium*. A la suite de ces observations nous avons prolongé les durées de culture des bactéries (voir matériel bactérien) et nous avons réalisé deux essais de technique d'inoculation sur balle de riz (BONNIER, 1957), utilisant le soja comme plante-test (Lac Alaotra et Anketrakabe).

TABLEAU 4

Point d'essai d'Ampangabe : action de l'inoculation sur la levée, la nodulation et les rendements

Plantes	Arachide (*d*) (SA 156)			Soja (*d*) (à grains blancs)		Haricot (*d*) (lingot blanc)	
	pieds manquants (%)	Nodules	Rendement	Nodules	Rendement	Nodules	Rendement
Témoin	5	47	100	1	100	1	100
60 kg/ha d'N ...	4	25	112	3	263	1	271
Souches S_1	34	104	94	61	391	17	240
Souches S_2	35	38	95	71	435	19	210
Souches S_3	42	29	84				
P.p.d.s. (5 %)...	± 6	± 36	± 19	± 5	± 101	± 4	± 30
P.p.d.s. (1 %)...	± 8	± 50	± 27	± 7	± 139	± 6	± 42
Test F	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
Valeur de 100 en kg/ha			3 610		177		197

Pour l'arachide, une semaine après le début de la floraison, la nodulation spontanée est importante (47 nodosités par pied en moyenne). L'inoculation avec le mélange S_1 (2 souches isolées en Israël) entraîne cependant une augmentation nette du nombre des nodules. La souche isolée au Congo (S_2) n'a pas d'effet. Il semble que l'inoculation avec des souches non spécifiques (S_3) ou l'apport d'azote minéral inhibent

la nodulation : cette tendance sera confirmée dans un autre essai arachide, au Lac Alaotra. Pour les rendements aucun traitement n'a d'action significative par rapport au témoin : l'azote ne constitue pas un facteur limitant. Cependant l'inoculation avec des souches non spécifiques de l'arachide (S_3) entraîne une diminution de rendement par rapport à l'apport d'azote minéral, diminution que l'on doit rapprocher de l'inhibition de la nodulation.

On doit cependant remarquer que dans cet essai, l'enrobage des graines avec le milieu de culture contenant les *Rhizobium* a entraîné une diminution de la levée pour les traitements S_1, S_2, S_3 de l'ordre de 40 à 50 p. 100 ; ceci pourrait expliquer le fait que malgré l'amélioration de la nodulation provoquée par A_1, il n'y ait pas d'augmentation décelable de rendement.

Pour le haricot et le soja, la nodulation spontanée est très faible. L'inoculation entraîne une augmentation hautement significative du nombre de nodules ; cette augmentation est plus importante pour le soja que pour le haricot. En outre l'augmentation de production de graines (de + 110 p. 100 à + 335 p. 100) et de matière sèche est très nette. Dans le cas du haricot, l'apport de 60 kg/ha d'azote a un effet plus net que l'inoculation ; c'est le contraire dans le cas du soja.

— *Sols moyennement désaturés sur migmatite : points d'essai de la Sakay et de Kianjasoa* (tabl. 5).

Deux essais ont été réalisés sur une variété de soja fourrager à grains blancs. Le premier à La Sakay portait sur la production de graines, le second à Kianjasoa (1) sur la production de matière verte. Dans les deux cas l'inoculation a provoqué une augmentation hautement significative du nombre de nodules et des rendements. Ces effets ont été particulièrement nets à la Sakay (+ 500 p. 100 d'augmentation, probablement à cause du fait que le sol a une teneur en azote assimilable plus faible).

TABLEAU 5

Sols ferrallitiques moyennement désaturés sur migmatite

Points d'essai du Moyen-Ouest. Action de l'inoculation sur les rendements du soja fourrager en matière verte et en graines, et sur la teneur en azote de la matière sèche des parties aériennes

Localités	Sakay (*d*)			Kianjasoa (*d*)		
	Nodules	Rendements		Nodules	Rendement (en matière verte)	Teneur en azote (% de la MS)
		Graines	Matière sèche			
Témoin	7	100	100	3	100	2,18
Inoculé	65	602	376	31	137	3,07
P.p.d.s. (5 %)	± 31			± 5		± 0,60
P.p.d.s. (1 %)	± 49			± 7		± 1,11
Test *t*	HS			HS		S
Valeur de 100 en kg/ha		240	470		17 233	

(1) Essais réalisés en collaboration avec l'Institut d'Elevage et de Médecine vétérinaire tropicaux (I. E. M. V. T.) à Madagascar.

Un dosage d'azote réalisé sur des échantillons provenant de Kianjasoa a montré que l'inoculation provoque une augmentation de la teneur en azote des parties aériennes au moment de la floraison. Un calcul utilisant la teneur en azote et le poids sec des fanes montre qu'à la Sakay, après culture de soja et exportation des graines, l'enfouissement des résidus de récolte apporterait environ 48 kg/ha d'azote au sol après inoculation et 13 kg/ha sans inoculation.

— *Sols fortement désaturés humifères, sur défriche d'une Légumineuse ligneuse : point d'essai d'Ambohimandroso* (tabl. 6).

Ces sols d'altitude sont relativement riches en matière organique (5,3 p. 100). La mise en culture, sur défriche d'une Légumineuse ligneuse *Acacia dealbata*, après apport de la fumure de redressement, permet une libération progressive d'azote assimilable (HAUT de SIGY, 1967). Deux questions importantes se posent :

- quelle est l'influence des *Rhizobium* locaux, spécifiques d'*Acacia dealbata*, sur la nodulation et la fixation d'azote des Légumineuses cultivées ?

- la libération d'azote à partir de la matière organique est-elle suffisante pour assurer aux Légumineuses une nutrition azotée permettant des rendements élevés ?

Pour l'arachide, contrairement aux autres types de sols ferrallitiques, la nodulation spontanée est faible. L'inoculation et l'apport d'azote minéral provoquent une meilleure croissance : la teinte verte du feuillage des plantes des parcelles inoculées et de celles ayant reçu de l'urée est nettement plus foncée que pour le témoin. Mais la tardivité du semis n'a pas permis de traduire cette action au niveau des rendements.

L'inoculation entraîne une augmentation significative du nombre de nodosités pour le pois et le haricot. Mais pour le haricot, ni cette meilleure nodulation, ni l'apport d'azote minéral ne provoquent d'accroissement de rendement.

Pour le soja, la nodulation spontanée est très élevée (entre 150 et 160 nodosités par pied en moyenne). Sur toutes les autres défriches de sol ferrallitique la nodulation naturelle du soja est pratiquement nulle. Même sur les colluvions riches en matière organique de Betafo la nodulation spontanée est beaucoup plus faible. On peut donc penser que les *Rhizobium* locaux spécifiques d'*Acacia dealbata* sont également infectieux pour le soja. L'inoculation n'entraîne pas d'augmentation du nombre de nodules mais provoque une stimulation de la croissance et une augmentation hautement significative des rendements qui ne peut s'expliquer que par une amélioration de la fixation symbiotique de l'azote ; celle-ci n'étant pas liée dans le cas présent à une augmentation du nombre total de nodosités ne peut être due qu'à un accroissement du nombre de nodosités *fixatrices*. Des dénombrements ont montré que l'inoculation provoque une augmentation relative du nombre de nodules fixateurs présentant une coloration interne rouge (tabl. 6). On peut penser que le même phénomène a eu lieu pour l'arachide, ce qui expliquerait que malgré l'absence d'augmentation du nombre de nodules, la fixation d'azote ait été nettement stimulée (coloration verte du feuillage plus intense).

Pour *Vigna sinensis* et *Voendzeia subterranea* la nodulation naturelle est importante ; dans ce cas l'inoculation, à l'aide des quelques souches dont nous disposons à l'heure actuelle, n'a pas eu d'effet sur la nodulation.

TABLEAU 6

Ambehimandroso : sol fortement désaturé humifère, sur défriche de Légumineuse ligneuse

Plantes	Pois	Arachide (*d*)		Soja (*d*)			Haricot (*d*)		*Vigna sinensis*	*Voandzeia subterranea*
Variétés	Locale	Valencia		Fourrager à grains blancs			Lingot blanc		Nodules	Rendement
	Nodules	Nodules	Rendement	Nodules	Rapport : Nb. nod. fixateurs / Nb. nod. non-fixateurs	Rendement	Nodules	Rendement		
Témoin	16	7	100	157	0,60	100	41	100	53	101
60 kg/ha d'N		6	105	153	0,71	96	45	90		
Souches S_1	101	8	105	185	4,05	117	98	90	55	122
Souches S_2		12	113	169	5,36	125	109	84		
P.p.d.s. (5 %)	± 36	± 5	± 19	± 70	± 2,32	± 12	± 31	± 23	± 13	± 44
P.p.d.s. (1 %)	± 49	± 7	± 26	± 98	± 3,21	± 16	± 43	± 31	± 21	± 69
Test F	HS	S	NS	NS	HS	HS	HS	NS	NS	NS
Valeur de 100 en kg/ha			1 756			1 328		261		

— *Sol faiblement désaturé sur basalte : point d'essai d'Anketrakabe* (tabl. 7).

La nodulation naturelle du haricot et du soja est très faible (1 à 2 nodosités par pied) et l'inoculation provoque une augmentation significative du nombre de nodules. Pour le soja l'apport de *Rhizobium*, indirectement sur un support de balle de riz déposé à côté des graines, a le même effet sur la nodulation que l'inoculation directe des graines.

TABLEAU 7

Point d'essai d'Anketrakabe : sol faiblement désaturé sur basalte

Plantes	Arachide (*d*)				Soja (à grains blancs)	Haricot (*d*) (lingot rouge)
	Nombre de nodules	Pieds manquants (%)	Hauteur *m* des plantes (cm)	Rendement	Nombre de nodules	Nombre de nodules
Témoin	94	21	42	100	2	1
Souche S_1	112	52	37	107	20	23
Souche S_2	101	45	35	103	19	
Souche S_3	96	64	26	68		
60 kg/ha d'N.....	87	33	42	116		
P.p.d.s. (5 %)	± 42	± 9	± 8	± 30	± 16	± 20
P.p.d.s. (1 %)	± 59	± 13	± 11	± 41	± 23	± 32
Tests F et *t*	NS	HS	HS	HS	(*t*) S	(*t*) S

La nodulation spontanée de l'arachide est importante (une centaine de nodosités par pied en moyenne) et aucun traitement n'en provoque de modification significative. Par contre l'inoculation avec A_3, mélange de souches non spécifiques, provoque une diminution significative de la hauteur des tiges et des rendements : ces faits peuvent s'expliquer si l'on admet l'hypothèse que les souches non spécifiques ont provoqué la formation de nodules peu ou pas fixateurs.

— *Sol faiblement désaturé sur migmatite : station agronomique du Lac Alaotra. Terrains ayant déjà porté des cultures de Légumineuses* (tabl. 8).

Le but de cette série d'essais était de déterminer si sur des sols peu désaturés, cultivés depuis longtemps, ayant déjà subi des cultures de Légumineuses (arachide, engrais vert, fourrage) et des enfouissements de fumier, l'inoculation peut avoir une action sur la nodulation.

L'essai arachide a été mis en place sur un terrain ayant déjà porté de l'arachide ; la nodulation spontanée y est extrêmement élevée ; environ 300 nodosités par pied en moyenne. Deux traitements présentent une action inhibitrice sur la nodulation : l'apport d'azote minéral (60 kg/ha) et l'inoculation avec des souches non-spécifiques.

Aucun traitement n'a d'action sur les rendements ; la nodulation étant bonne, l'azote ne constitue pas un facteur limitant.

TABLEAU 8

Sol ferrallitique faiblement désaturé.
Terrains ayant déjà porté des cultures de Légumineuses

	Plantes annuelles			Plantes pérennes	
	Arachis hypogaea		*Glycine max*	*Desmodium intortum*	*Phaseolus atropurpureus*
	Nodules	Rendement	Nodules	Nodules	Nodules
Témoin	303	100	14	15	9,6
60 kg/ha d'N	231	96			
Souche S_1	312	89	72	31	15,2
Souche S_2	277	88			
Souche S_3	249	90			
P.p.d.s. (5 %)	± 50	± 13	± 22	± 12	± 3
P.p.d.s. (1 %)	± 68	± 16	± 36	± 20	± 4
Tests F et *t*	(F) HS	(F) NS	(*t*) HS	(*t*) S	(*t*) HS
Valeur de 100 en kg/ha		2 009			

Pour le soja par contre, l'inoculation est utile, de même que pour deux légumineuses fourragères *Desmodium intortum* et *Phaseolus atropurpureus*. Ces résultats sont importants : en effet, il semble que même pour des sols peu désaturés et pour des Légumineuses tropicales l'inoculation soit nécessaire.

b) *Sols ferrugineux tropicaux.*

— *Sol à phase hydromorphes humifère : point d'essai d'Ihosy* (tabl. 9).

Sur ce sol sableux peu lessivé et relativement riche en matière organique, les rendements de l'arachide sont élevés même pour le témoin (3 644 kg/ha) et ni l'apport d'urée, ni l'inoculation ne provoquent une augmentation des rendements.

— *Sols sableux non-humifères : points d'essai d'Ambovombe, Ankazoabo et Taheza* (tabl. 9).

Sur le haricot, l'inoculation provoque une amélioration de la nodulation (Ambovombe) et un accroissement des rendements (Taheza). L'apport de *Rhizobium* a un effet plus important (+ 228 p. 100) que l'apport d'urée (+ 115 p. 100).

A Ankazoabo, sur arachide, l'inoculation avec les souches israéliennes (S_1) est suivie d'une augmentation hautement significative du poids de la récolte en gousse (+ 55 p. 100) de même que l'apport de 60 kg/ha d'azote minéral (+ 45 p. 100). Par

contre, l'inoculation avec la souche provenant du Congo (S_2) et avec le mélange de souches non spécifiques (S_3) ne détermine pas d'effets significatifs.

TABLEAU 9

Sols ferrugineux tropicaux : résultats des essais

Localités	Ankazoabo (*d*)		Taheza		Ihosy
Plante	Arachide		Haricot (coco blanc)		Arachide (Mwitunde)
	Nodules	Rendement	Nodules	Rendement	Rendement
Témoin	15,2	100	20	100	100
60 kg/ha d'N	5,3	144	18	215	95
Souches S_1	11,8	155	18	154	96
Souches S_2	9,3	110	17	328	95
Souches S_3	16	103			93
P.p.d.s. (5 %)		± 22	± 4	± 104	± 10
P.p.d.s. (1 %)		± 30	± 5	± 143	± 14
Test F	NS	HS	NS	HS	NS
Valeur de 100 en kg/ha		980		137	3 644

c) *Sols colluviaux. Terrain ayant déjà subi des cultures de Légumineuses : point d'essai de Betafo (tabl. 10).*

Le choix de ce point d'essai situé sur des colluvions riches en matière organique (7 p. 100) de C/N relativement bas (entre 12 et 13) avait pour but d'étudier si l'inoculation reste nécessaire sur des sols fertiles, régulièrement cultivés, pour des plantes de culture traditionnelle comme le haricot, et pour des plantes nouvellement cultivées, à exigence spécifique comme le soja.

L'inoculation par enrobage direct des graines a eu un effet dépressif sur la germination du haricot dont la nodulation naturelle est satisfaisante. Par contre, pour le soja, l'apport de *Rhizobium* entraîne une amélioration de la nodulation et un accroissement de la production de graines.

2. *Expérimentation sur sols de rizière*

Soja (tabl. 11).

Sur les divers types de sol de rizière (Ambatofotsy, Andramasina, Manjakandriana), la nodulation naturelle est nulle et l'inoculation provoque une augmentation très nette du nombre des nodosités, des rendements et de la teneur en protéines des parties aériennes.

Pois (tabl. 12 et 13).

L'inoculation du pois entraîne les mêmes effets. Une étude de la répartition des

TABLEAU 10

Sol colluvial ; terrains ayant déjà porté des cultures de Légumineuses
Betafo : Résultats des essais

Plantes	Haricot			Soja (à grains blancs)	
	Pieds manquants (%)	Nodules	Rendement	Nodules	Rendement
Témoin	14	49	100	22	100
60 kg/ha d'N	17	40	107	23	94
S_1	43	45	57	127	112
S_2	50	50	55	124	111
P.p.d.s. (5 %) P.p.d.s. (1 %)	+ 17 ± 23		± 18 ± 25	± 46 ± 64	± 14 ± 19
Test F	HS	NS	HS	HS	S
Valeur de 100 en kg/ha			453		2 158

TABLEAU 11

Inoculation du soja sur sols de rizière : dénombrement des nodules, rendements en vert, teneur en protéines de la matière sèche

Points d'essai	Traitements	Nombre de nodules (pour 20 pieds)	Matière verte (en kg/ha)	Teneur en protéines de la matière sèche (%)
Ambatofotsy	eau	2	9 285	8,32
	oligo-éléments	0	7 140	9,52
	Rhizobium	685	16 420	17,65
	Rhizobium + Thiabendazole	899	18 214	16,83
Andramasina	eau	0	3 750	11,04
	oligo-éléments	35	4 640	10,84
	Rhizobium	642	5 170	16,02
	Rhizobium + Thiabendazole	324	6 250	12,34
Manjakandriana	eau	20	7 500	10,78
	oligo-éléments	0	3 750	8,41
	Rhizobium	465	12 700	17,17
	Rhizobium + Thiabendazole	443	12 100	17,31

nodosités en fonction de la profondeur montre que l'inoculation provoque la formation des nodules à proximité immédiate des collets. Il semble que les *Rhizobium* ne puissent pas se déplacer en profondeur : il faut signaler que pour les cultures de contre-saison sur rizière le mouvement de l'eau dans le sol est ascendant.

TABLEAU 12

Essai pois à Ambatotsy : répartition des nodosités sur les racines en fonction des traitements

Traitements	Témoin	*Rhizobium*	Fumier	Engrais azoté
Nombre total des nodules...	15	122	42	12
Nombre de nodules situés en surface (0-5 cm).....	14	99	21	1
Nombre de nodules situés en profondeur (5-10 cm) .	1	23	21	11

Essais de saison des pluies (tabl. 13).

TABLEAU 13

Essais sur sols de rizière : numération des nodules

Point d'essai	Belanitra			Ambatofotsy
	Glycine max	*Vigna sativa*	*Vigna sinensis*	*Pisuum sativum*
Témoin	18	1	1,3	5
Inoculé	48	6,5	8,5	41
P.p.d.s. (5 %) ...	± 14	± 2,5	± 3,5	± 10
P.p.d.s. (1 %) ...	± 22	± 4	± 5,5	
Test *t*	HS	HS	HS	HS

Ils ont permis de montrer que sur ces sols de rizière, l'inoculation est utile non seulement pour les Légumineuses tempérées (*Vicia sativa*) ou exigeantes (*Glycine max*) mais également pour une Légumineuse tropicale comme *Vigna sinensis* qui présente en général une abondante nodulation sur sols de colline.

Action de l'enfouissement des parties aériennes de Légumineuses sur le rendement du riz (tabl. 14).

Le dispositif expérimental utilisé est de type blocs avec 5 traitements. Pendant la saison sèche, trois traitements sont constitués par la culture de Légumineuses (pois, soja et vesce), les deux autres étant laissés en jachère. Les graines des trois espèces ont été inoculées avec des *Rhizobium* spécifiques. La vesce a eu une croissance pratiquement nulle. Le pois a eu le temps d'arriver à maturité ; les fanes sèches

ont été enfouies après récolte des graines ; la récolte était faible. Le soja par contre a été enfoui comme un engrais vert : le rendement était faible (6,925 kg/ha de matière verte).

TABLEAU 14

Point d'essai de Mahitsy : action de l'enfouissement des fanes de trois Légumineuses sur les rendements de riz

Culture de contre-saison (1966)	Fumure pour le riz (1966-67)	Rendements en paddy		Test p.p.d.s.
		en kg/ha du témoin	en % du témoin	
Jachère	0	3 271	100	
Jachère	50 kg/ha d'N	3 938	120	HS
Vesce	0	3 378	103	NS
Soja	0	3 653	112	S
Pois	0	3 632	111	NS
P.p.d.s. (5 %)		± 379	± 11,5	
P.p.d.s. (1 %)		± 522	± 15,9	

L'apport de 50 kg/ha d'azote (sur l'un des deux traitements laissés en jachère) entraîne une augmentation hautement significative des rendements (+ 20 p. 100) ; les accroissements provoqués par le pois (+ 11 p. 100) et le soja (+ 12 p. 100) sont à la limite de la signification.

3. *Comparaison des effets de l'inoculation et d'un apport d'azote minéral*

Si l'on compare les rendements obtenus par inoculation à l'aide de souches convenables (R) et par apport de 60 kg/ha d'azote sous forme d'engrais (N) avec les rendements témoins (T) pour l'arachide, le haricot et le soja, on peut dresser le tableau 15. Le signe = signifie qu'il n'y a pas de différence significative entre les traitements, au seuil P = 0,05.

TABLEAU 15

Action comparée de l'inoculation (R) *et de l'apport d'un engrais azoté* (N) *sur les rendements de l'arachide, du haricot et du soja, en fonction du type de sol*

	Teneur en matière organique	Arachide	Haricot	Soja
Sols ferrallitiques	non humifères	R = N = T	N > R > T	R > N > T
	humifères	R = N > T	R = N = T	R > N = T
Sols ferrugineux tropicaux	non humifères	R = N > T	R > N > T	
	humifères	R = N = T		

DISCUSSION

L'expérimentation en plein champ nous a permis d'obtenir de nombreux résultats d'intérêt pratique. Mais l'interprétation générale de ces résultats est limitée par deux types de restrictions.

La première limite est inhérente à la méthode : l'inoculation. Ainsi, le fait que l'apport de *Rhizobium* provoque une augmentation du nombre de nodules veut obligatoirement dire que l'absence de *Rhizobium* spécifiques est un facteur limitant de la nodulation dans le sol étudié ; par contre si l'inoculation ne provoque pas d'effets cela ne signifie pas obligatoirement que l'absence de *Rhizobium* ne soit pas limitante ; cela peut signifier que l'inoculum était qualitativement impropre ou quantitativement insuffisant ou que la technique d'inoculation était inefficace. Toutes ces propriétés de l'inoculum ne pouvant que s'améliorer avec les recherches, la liste des types de sol et des plantes pour lesquelles l'inoculation serait utile ne peut que s'allonger.

Par ailleurs les essais n'ont été effectués que pendant une campagne et les conclusions que l'on peut tirer doivent être plutôt considérées, dans certains cas, comme des hypothèses de travail pour l'expérimentation future.

Les Rhizobium *dans les sols*

La comparaison de la nodulation naturelle et de celle provoquée par inoculation nous renseigne sur la présence des *Rhizobium* dans les différents types de sol.

Sur défriche en sols ferrallitiques peu ou moyennement lessivés, de pH inférieur à 5,0, recouverts d'une végétation homogène de Graminées, on peut distinguer deux groupes :

— les Légumineuses tempérées (*Phaseolus vulgaris* et *Pisum sativum*) et d'origine asiatique (*Glycine max*) ont une faible nodulation naturelle ;

— les Légumineuses tropicales dans leur ensemble ont une meilleure nodulation, surtout *Vigna sinensis* et *Voendzeia subterranea*, mais l'apport de *Rhizobium* spécifiques peut cependant améliorer la nodulation : c'est le cas d'*Arachis hypogaea* et de Légumineuses pérennes herbacées (*Desmodium intortum* et *Phaseolus atropurpurens*).

L'inoculation entraîne une augmentation du nombre de nodosités et de la croissance sur *Acacia dealbata*, Légumineuse ligneuse utilisée pour la conservation des sols et la lutte contre l'érosion ; ce résultat est en accord avec ceux déjà obtenus au Japon sur *Acacia dealbata* par ISHIZAWA (1960) et en Amérique latine sur *Mimosa caesalpinifolia* par DOBEREINER (1966).

Sur sol fortement désaturé, riche en matière organique et ayant subi une culture prolongée d'*Acacia dealbata*, on observe une différence très nette entre *Vigna sinensis* et *Voendzeia subterranea* d'une part, présentant une nodulation importante, et *Arachis hypogaea* présentant une très faible nodulation. Ce fait confirme d'autres observations qui tendent à montrer qu'à Madagascar, les *Rhizobium* de *Vigna sinensis* ne sont pas efficaces pour *Arachis*. Les *Rhizobium* de Légumineuses tempérées sont peu abondants. Pour *Glycine max* on observe une nodulation naturelle très abon-

dante, probablement due au fait que les *Rhizobium* d'*Acacia dealbata* (groupe *Cowpea*) sont infectieux pour *Glycine max* (groupe *Japonicum*) mais provoquent la formation de nodosités peu ou pas fixatrices.

Sur sols sableux pauvres en matière organique, les *Rhizobium* sont en nombre insuffisant aussi bien pour des Légumineuses tropicales comme *Arachis* que pour *Phaseolus vulgaris*. Ces résultats sont en accord avec les travaux de VYAS et PRASAD (1960) concernant les causes de l'échec de la culture du pois sur certains sols sableux, et avec ceux de SATYANARYAN et GAUR (1965) sur la nodulation naturelle en zone aride.

Les sols de rizière semblent pauvres non seulement en *Rhizobium phaseoli*, *R. leguminosarum* et *R. japonicum* mais également en *Rhizobium* du groupe « *Cowpea* ». On peut penser que cette pauvreté est due au fait que ces sols sont inondés plus de six mois par an. ISHIZAWA (1960, communication personnelle) signale qu'au Japon les engrais verts utilisés sur rizière, *Astragalus sinicus* et *Glycine max*, sont inoculés dans la pratique agricole.

Spécificité et compétitivité des souches : nécessité d'une sélection

A Ambohimandroso (sol ferrallitique humifère), sur défriche d'*Acacia dealbata*, le soja présente spontanément de très nombreuses nodosités (environ 150 par pied, en moyenne). Cette observation est très surprenante : en effet le soja est connu pour avoir des exigences très spécifiques. On peut avancer l'hypothèse que les *Rhizobium* de l'*Acacia*, Légumineuse ligneuse subspontanée dans la région, sont capables d'induire la formation de nodules sur soja. Cependant l'inoculation des graines de soja avec des *Rhizobium* isolés de nodules de soja, sans modifier le nombre total de nodules, entraîne une augmentation de la fixation d'azote ; une observation de la partie interne des nodosités montre que l'inoculation a entraîné une augmentation hautement significative du pourcentage des nodules fixateurs (tabl. 6). On doit conclure que les *Rhizobium* locaux, très abondants, probablement spécifiques de l'*Acacia*, sont capables de provoquer la formation de nodules sur soja mais que la plupart de ces nodules sont incapables de fixer l'azote : ils sont inefficients. Par ailleurs, les souches de soja inoculées ont été compétitives : en effet, entrant en compétition au niveau des racines avec les souches locales abondantes, elles ont été capables d'induire la formation de nodules fixateurs.

Une observation identique a été faite sur arachide : la souche A_1, sans augmenter le nombre des nodosités, a provoqué une augmentation visible de la fixation d'azote ; il est vraisemblable qu'elle est entrée en compétition avec les souches locales peu efficientes.

L'exemple du soja montre qu'une nodulation abondante n'est pas toujours liée à une fixation importante d'azote et que l'inoculation peut non seulement apporter des *Rhizobium* à une plante poussant dans un sol qui en est dépourvu, mais encore provoquer une amélioration de la fixation par un changement au niveau du partenaire bactérien de la symbiose lorsque les souches locales sont peu ou pas efficientes. Ceci n'est possible qu'avec des souches susceptibles d'entrer en compétition au niveau des racines avec les souches locales.

Un autre exemple de compétition entre souches est donné par l'inoculation de l'arachide avec le mélange A_3 constitué de souches isolées de *Desmodium intortum*,

Lupinus albus, et *Vigna sinensis*. L'inoculation avec A_3 entraîne une diminution significative du nombre des nodules (Lac Alaotra) et du rendement (Anketrakabe). La diminution du nombre de nodules peut s'expliquer par une prolifération dans la rhizosphère des souches inoculées, non spécifiques. A Anketrakabe, la diminution de rendement n'est pas accompagnée d'une diminution du nombre de nodosités : on peut l'expliquer par l'infection de l'arachide par les souches non spécifiques inoculées, peu ou pas efficientes sur l'arachide. Des études précises de la spécificité, en serre, sont maintenant indispensables.

Colonisation des racines par les bactéries

Pour les cultures de contre-saison sur rizières, après inoculation, les nodosités de soja et surtout de pois se forment à proximité immédiate des graines ; pendant cette saison, le mouvement de l'eau dans le sol est ascendant. Par contre, pendant la saison des pluies les nodules sont mieux répartis sur le système racinaire et se trouvent souvent à plus de 5 cm de profondeur. On peut conclure que le mouvement de l'eau dans le sol est important pour le transport des bactéries inoculées ; cela signifie que les racines n'entraînent pas les bactéries à leur surface pendant leur croissance, dans les conditions de l'expérience.

Il serait important de déterminer si cette limite à la migration ne limite pas le nombre de nodosités et si la disposition très groupée des nodules ne limite pas la fixation. D'autre part il faudrait déterminer quels sont les facteurs qui empêchent cette migration ; ces facteurs sont-ils liés aux conditions physico-chimiques du sol (au pH par exemple) ?

En fonction des réponses à ces questions il faudra probablement mettre au point des techniques d'inoculation particulières.

Techniques d'inoculation

L'inoculation par enrobage direct des graines, à l'aide du support poudreux contenant les *Rhizobium* et le milieu de culture sur lequel ils ont poussé, a provoqué dans de nombreux essais une diminution hautement significative de la levée.

On peut avancer l'hypothèse que la mauvaise levée a été causée par une pourriture des graines par des champignons dont la prolifération sur les semences a dû être provoquée par des composés organiques encore présents dans le milieu ayant servi à la culture des *Rhizobium*. A la suite de ces observations, utilisant la technique de Bonnier (1960) nous avons pu vérifier que l'inoculation indirecte, sur balle de riz dont une pincée est ajoutée dans les poquets à proximité des graines au moment du semis, était aussi efficace sur la nodulation que l'enrobage direct des graines. En outre, cette technique permet de désinfecter les graines avec des fongicides à base d'organomercuriques sans nuire à la nodulation. Cette technique est valable pour les Légumineuses vivrières avec semis manuel en poquets. Des recherches doivent être menées pour résoudre le problème dans les cas de semis mécaniques, encore rares à Madagascar.

Loneragan et *al.* (1955) ont signalé que l'enrobage des graines du trèfle avec de la chaux favorisait la nodulation puis l'établissement de la plante ; les résultats obtenus depuis sur trèfle sont concordants (Adams, 1965). Il faut signaler que l'emploi de cette technique peut pour d'autres plantes provoquer l'effet inverse : c'est le cas pour le lupin et pour *Ornithopus sativus* (Parker et Oakley, 1965).

Survie des Rhizobium *dans le sol et réinoculation*

Nous ne disposons encore d'aucun élément expérimental sur la survie des *Rhizobium* dans les sols après inoculation.

En effet, les essais réalisés sur des terrains ayant déjà subi des cultures de Légumineuses, comme l'essai haricot à Betafo et les essais arachide et soja au Lac Alaotra, ont été mis en place sur des sols possédant des caractéristiques différentes de celles des principaux sols à mettre en culture : forte teneur en matière organique (7,0 et 4,1 p. 100), forte capacité d'échange (27,8 et 18 m.e. p. 100) et pH relativement élevé (5,5 et 6,2). Il n'est pas surprenant que dans de tels sols, la survie des *Rhizobium* après culture soit satisfaisante.

On peut penser que sur les sols ferrallitiques de colline très lessivés, le pH compris entre 4,0 et 5,0 doit être le facteur limitant majeur à la survie, pour les *Rhizobium* de Légumineuses tempérées comme le haricot et le pois. On peut penser en effet que la survie des *Rhizobium* de Légumineuses tropicales doit être meilleure dans ces sols (Hausen et *al.*, 1957).

Sur les sols de rizière, on peut prévoir que la survie des *Rhizobium* sera moins bonne ; en effet les Légumineuses cultivées sur rizière pendant la saison sèche sont essentiellement des plantes originaires de pays tempérés, résistantes au froid, dont les *Rhizobium* sont en général mal adaptés aux sols acides. En outre, l'inondation de ces sols pendant la saison des pluies doit être un facteur défavorable à la survie.

Quant aux sols sableux, il est probable que la réinoculation y soit nécessaire (Vyas et Prasad, 1960).

Mais ce ne sont là que des hypothèses ; des recherches sur ce problème sont indispensables. Il faudra tenir compte du fait que l'aptitude à la survie dans les sols peut varier selon les souches (Goss et Shipton, 1965).

Comparaison des effets de l'inoculation et d'un apport d'azote minéral

Les différences d'action décrites dans le tableau 15, statistiquement significatives, peuvent être considérées comme des faits et être interprétées.

Sur sol ferrallitique non-humifère pour le *haricot* N > R > T alors que pour le *soja* R > N > T. Comment interpréter ce fait ? L'accroissement de production de graines, par rapport au témoin, produit par l'azote minéral est du même ordre de grandeur pour le haricot et le soja (de + 160 p. 100 à + 170 p. 100) c'est-à-dire que 60 kg d'azote provoquent un accroissement de production d'environ 290 kg/ha pour le soja et 335 kg/ha pour le haricot, soit respectivement 4,8 kg et 5,5 kg par kg d'azote. Par contre, l'inoculation provoque une augmentation de rendement en grains de 110 à 140 p. 100 pour le haricot et de 390 à 435 p. 100 pour le soja.

Les rendements étant rapportés au témoin, on pourrait penser que la différence est liée à une meilleure fixation naturelle par le haricot due au fait que les *Rhizobium* spécifiques de cette plante, anciennement cultivée à Madagascar, sont naturellement plus abondants que ceux spécifiques du soja. On doit rejeter cette hypothèse : en effet, dans cet essai (Ampangabe), comme pour les autres défriches de sols ferrallitiques (Mahabo, Anketrakabe), la nodulation naturelle est très faible pour les deux

plantes. On ne peut expliquer cette différence que par une plus grande efficacité du système symbiotique provoqué par inoculation sur le soja que sur le haricot.

Pour tous les essais soja R > N : les variétés utilisées ayant un cycle relativement long la fixation d'azote a été importante. Il semblerait donc que le haricot soit plus apte à utiliser l'azote minéral que le soja et que le système fixateur d'azote, dans l'état actuel de la sélection, soit plus efficace pour le soja que pour le haricot.

Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus sur soja par KUSHIZAKI, ISHIZUKA et AKANATSU (1964), WEBER (1960), sur haricot par BRAKEL et MANIL (1965) et sur haricot et soja par OBATON (1967).

Pour l'*arachide* sur sols ferrallitiques non humifères :

$$R = N = T$$

L'azote ne constitue pas un facteur limitant : la nodulation naturelle, importante, permet une nutrition azotée suffisante de la plante. Ces résultats confirment ceux obtenus par SEEGER au Congo (1961).

Sur sols ferrallitiques humifères, on observe un effet visible de l'azote minéral et de l'inoculation sur la coloration des parties aériennes : l'effet azote est observé sur un sol beaucoup plus riche en azote assimilable que les sols précédents. On peut avancer que la nodulation spontanée de l'arachide sur ce sol de défriche d'*Acacia dealbata* étant très faible, la fixation est faible ; l'arachide semblerait donc assurer sa nutrition azotée essentiellement par fixation et être moins apte que des graminées à utiliser l'azote du sol.

Sur sols ferrugineux tropical non humifère, $R = N > T$ pour l'arachide et $R > N > T$ pour le haricot : l'azote est un facteur limitant majeur et l'inoculation semble assurer une meilleure nutrition azotée que l'engrais minéral. Ces résultats sont faciles à interpréter : pour des sols contenant environ 80 p. 100 de sable, le coefficient d'utilisation des engrais azotés doit être faible. Par contre, sur les sables humifères, l'azote n'est pas un facteur limitant majeur.

Rôle de la fertilisation non azotée sur la fixation

Il faut rappeler à ce sujet que l'inoculation, en améliorant la nutrition azotée, ne peut provoquer d'augmentation de rendement que si l'azote est le facteur limitant majeur, c'est-à-dire que si les autres éléments (P, K, Ca, etc.) sont disponibles pour la plante.

Sur des sols pauvres en *Rhizobium* convenables, comme des défriches de sols ferrallitiques pour le haricot, le facteur limitant majeur de la fixation, après apport des éléments essentiels, est l'absence de *Rhizobium*.

Après inoculation, il serait intéressant de déterminer si les oligo-éléments du sol, surtout le molybdène, oligo-élément indispensable à la fixation de l'azote, sont fixés sous une forme non assimilable (JONES, 1956) ; le chaulage serait bénéfique pour certaines Légumineuses, par la libération de molybdène qu'il provoque. Quant au problème important de l'influence du calcium et du pH du sol sur les *Rhizobium* (NORRIS, 1958), tant au niveau de la rhizosphère au moment de l'infection, que dans le sol pour la survie des *Rhizobium* après culture d'une Légumineuse, nous ne l'avons pas encore abordé.

CONCLUSIONS

Nous pouvons tirer deux types de conclusions :

1° des conclusions qui peuvent être considérées comme certaines et qui ne demanderont pour devenir vulgarisables que quelques confirmations et mises au point.

L'inoculation augmente nettement la fixation d'azote pour :

— les Légumineuses cultivées en contre-saison (haricot, pois, soja et vesce) sur tous les types de sols de rizière étudiés,

— sur les terres nouvellement mises en culture sur colline, pour le soja quels que soient les types de sols (ferrallitiques humifères et non-humifères, colluvions) et pour le haricot sur les sols ferrallitiques non humifères,

— sur les sables roux typiques, non humifères, du Sud et de l'Ouest, pour l'arachide et le haricot.

2° Des conclusions qui doivent être considérées comme des orientations pour les recherches futures.

L'inoculation entraîne une augmentation du nombre de nodosités sur les Légumineuses tropicales pérennes :

— fourragères comme *Desmodium intortum* et *Phaseolus atropurpureus*,

— ou ligneuse comme *Acacia dealbata*.

Reçu pour publication en juin 1968.

REMERCIEMENTS

Nous remercions M. P. ROCHE, Directeur de l'I. R. A. M. à Madagascar pour toutes les facilités qu'il nous a accordées pour notre travail, ainsi que pour ses conseils et ses critiques ; ce travail d'expérimentation n'a pu être réalisé qu'avec les conseils et l'aide du Personnel des Divisions d'Agrologie d'Agronomie, de Pathologie végétale ainsi que du Service d'Expérimentation et des Unités d'Expérimentation régionale de l'I. R. A. M.

Nous remercions également M. le Professeur Ch. BONNIER de l'Institut agronomique de Gembloux et M. J. SCHIFFMAN du Centre de Recherches agronomiques de Bet Dagone qui ont eu l'amabilité de nous fournir des souches de *Rhizobium* spécifiques d'*Arachis hypogaea* et *Stylosanthes gracilis*.

SUMMARY

INOCULATION OF LEGUMES IN MADAGASCAR. EXPERIMENTAL RESULTS

Open field experiments in inoculation of different seeds of Legumes with specific Rhizobium strains have been carried out in Madagascar. The experiments dealt mostly with varieties of groundnut, bean, soybean and forage plants. The tests were performed during the rainy as well as the dry seasons on various typical soils.

The result is especially effective on soybean, irrespective of the type of soil, on bean and groundnut in sandy soils deficient in organic matter.

Besides, inoculation on paddy soils brings forth a significant increase of the number of nodules on all the plants tested.

ZUSAMMENFASSUNG

OKULIERUNG VON HÜLSENFRÜCHTEN IN MADAGASKAR.
ERGEBNISSE DER EXPERIMENTE

In Madagaskar wurden auf dem Felde Okulierungen von Hülsenfruchtensamen mit spezifischen Rhizobien durchgeführt. Diese Versuche, die sich im wesentlichen auf Erdnuss-, Bohnen- und Sojabohnensorten sowie auf Futter pflanzen erstreckten, wurden während der Regen- und der Trokkenzeit auf verschiedenen charakteristischen Bodentypen ausgeführt. Die Okulierung auf Sojabohne ist, unabhängig vom Bodentypus, stets besonders wirksam.

Die Impfung auf Bohne und Erdnuss erwies sich wirksam auf Sandböden, die arm an organischer Materie sind. Ausserdem ruft die Okulierung auf Reisböden immer eine erhebliche Zunahme der Knöllchenzahl bei allen Versuchspflanzen hervor.

РЕЗЮМЕ

Инокуляция бобовых на Мадагаскаре. Экспериментальные результаты.

Ж. ДЭНАРИЕ.

Полевые опыты по инокуляции семян бобовых видовыми формами Rhizobium были реализованы на острове Мадагаскар. Подопытными растениями были различные сорта арахиса, фасоли, сои и кормовых культур. Опыты эти были проведены во время дождливого и сухого сезонов, на разнообразных типах характерных почв Мадагаскара.

Инокуляция оказывает особенно сильное действие на сою, на всех типах испробованных почв, и на фасоль и арахис на песчанных почвах небогатых органическим веществом.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ADAMS A. F. R., 1965. Observations on legume establishment and growth on acid soils. *N. Z. Grassl. Ass. Proc.*, 115-122.

BONNIER C., 1957. Symbiose *Rhizobium*-Légumineuses en région équatoriale (I). *Public. I. N. E. A. C.*, Sér. Scient, nº 72.

BONNIER C., SEEGER J., 1958. Symbiose *Rhizobium*-Légumineuses en région équatoriale (II). *Public. I. N. E. A. C.*, Sér. Scient., nº 76.

BONNIER C., 1960. Symbiose *Rhizobium*-Légumineuses : aspects particuliers aux régions tropicales. *Ann. Inst. Pasteur*, **99**, 537-556.

BOSSER J., DOMMERGUES Y., 1952. Un essai d'inoculation de la Minette (*Medicago lupulina*) à Madagascar. *Le Naturaliste Malgache*, **4** (2), 169-175.

BRAKEL J., MANIL P., 1965. Fixation symbiotique de l'azote par le haricot (*Phaseolus vulgaris L.*). Essais d'inoculation avec *Rhizobium phaseoli*. *Bull. Inst. agron. Stn. Rech. Gembloux*, **33**, 3-25.

BUMPUS E. D., 1957. Legule nodulation in Kenya. I. Exploratory field experiments. *E. afr. agric. Forest. J.*, **23**, 91-99.

BUMPUS E. D., POULTNEY R. G., 1960. The problem of nitrogen fixation by legumes in Kenya in relation to soil nutrient status. *Proc. 8th internation. Congr. Reading*, 224-247

CELTON J., VELLY J., ROCHE P., 1966. Fertilisation de redressement après diagnostic des carences minérales sur les sols de culture sèche à Madagascar. *Inst. Rech. agron. Madagascar*, **79**.

DAWSON R. C., 1962. Inoculation for better pasture and forage legumes in the tropics. *J. Range Mgmt.*, **15**, 252-257.

DOBEREINER J., 1966. Inoculation of seed beds of sabia (*Mimosa caesalpinifolia*) with *Rhizobium*. *I Congrosso Panamericano de Concervacao do Solo, Sao Paulo.*

DONALD C. M., 1965. The progress of Australian agriculture and the role of pastures in environmental change. *Austral. J. Sci*, **27**, 187-198.

EZEDINMA F. O. C., 1964. Effects of inoculation with local isolates of *cowpea Rhizobium* and application of nitrate-nitrogen on the development of cowpeas. *Tropic. Agric.*, **41** (3), 243-249.

GOSS O. M., SHIPTON W. A., 1965. Nodulation of legumes on new light land. 4. Rhizobial strains for pasture establishment. *J. Agric. west. Austral.*, **6**, 663-669.

HAUT de SIGY G. de., 1967. Compte rendu d'essais concernant la diversification des cultures sur les collines du Vakinankaratra ; document de travail. *Inst. Rech. agron. Madagascar*, **116**.

HAUSEN (S. S.) Von, SAUBERT S., VAN GLIYSWIYK N. O., 1957. The survival of *Rhizobium* bacteria in soil. *Afr. J. Sci.*, **53**, 233-235.

HENZELL E. F., NORRIS D. O., 1962. Processes by which nitrogen is added to the soil/plant system. Commonw. Bur. *Pastures and Fields Crops Bull.*, **46**, 1-18.

JONES L. H. P., 1956. *Science*, **123**, 3208, 1116.

KUSHIZAKI M., ISHIZUKA J., AKAMATSU F., 1964. Physiological studies on the nutrition of soybean plants. I. Effects of nodulation on the growth, yield and nitrogen content. *J. Sci. Soil Manure*, Tokyo, **35**, 319-327.

LONERAGAN J. F., MEYER D., FAWCETT R. G., ANDERSON A. J., 1955. Lime pelleted clover seeds for nodulation on acid soils. *J. austral. Inst. agric. Sci.*, **71**, 264-265.

MASEFIELD G. B., 1958. *Some factors affecting nodulation in the tropics. In « Nutrition of the legumes »*, 202-215, Hallsworth E. G., Butterworths, London.

NORRIS D. O., 1958. *Lime in relation to the nodulation of legumes. In « Nutrition of the legumes »*, 164-182, Hallsworth E. G., Butterworths, London.

OBATON M., BLACHÈRE H., 1965. L'inoculation de la luzerne. II. Résultats de l'expérimentation. *Ann. agron.*, **16** (1), 25-51.

OBATON M., 1967. L'inoculation des Légumineuses. *Bull. Techn. Inform. Ingrs. Serv. agric.*, **219**, 1-9.

PARKER C. A , OAKLEY A E., 1965. Reduced nodulation of lupins and serradella due to lime pelleting. *Austral. J. exper. Agric. Anim. Husb.*, **5**, 144-146.

SATYANARYAN Y., GAUR Y. D., 1965. Preliminary studies on the nodulation of arid zone legumes. *Curr. Sci.*, **34**, 21-22.

SEEGER J. R., 1961. Effets d'une fumure azotée sur la nodulation et le rendement de l'arachide. *Buil. Inst. agron. Stn Rech. Gembloux*, **29** (2), 197-218.

TEWARI G. P., 1965. Effects of nitrogen, phosphorus and potassium on nodulation in cowpea. *Expl. Agric.*, **1**, 257-259.

VELLY J., CELTON J., ROCHE P., 1966. Fertilisation de fond en rizière à Madagascar. *Inst. Rech. agron. Madagascar*, **103**.

VYAS S. R., PRASAD N., 1960. Investigations on the failure of peas in « Goradu » soils of Gujarat. *Proc. Indian Acad. Sci.*, **51** *B*, 242-248.

WEBER C. R., 1966. Soybean nodules work for you. *Iowa Farm Science*, **20** (2), 3-5.

WHYTE R. O., NILSON-LEISSNER G., TRUMBLE H. C., 1956. Les Légumineuses en Agriculture. *Et. agric., F. A. O.*, V. **21**, F. A. O., Rome.

Ann. agron., 1968, **19** (4), 497-503.

CHRONIQUE DES LIVRES

MÉTHODES NOUVELLES DE SPECTROSCOPIE INSTRUMENTALE. Compte rendu du colloque organisé par le C. N. R. S., à Orsay du 25 au 29 avril 1966. — Paris, Éd. C. N. R. S., coll. des Colloques internationaux du C. N. R. S., n° 161, 1967, 344 p.

Le premier Colloque organisé par le C. N. R. S. en 1957 avait marqué une étape importante dans la compréhension et les progrès des méthodes spectroscopiques. Ce deuxième Colloque a permis de faire le point sur leur développement et leurs applications. C'est sur la Spectroscopie par Transformation de Fourier qu'ont porté le plus grand nombre de communications. Mais une quinzaine d'autres méthodes ont été utilisées et décrites; leurs performances et leurs difficultés dépendent beaucoup du domaine d'application et cette spécificité explique qu'un aussi grand nombre de procédés différents soient simultanément étudiés.

MISES AU POINT DE CHIMIE ANALYTIQUE, ORGANIQUE, PHARMACEUTIQUE ET BROMATOLOGIQUE, publiées sous la direction de J. A. GAUTIER et P. MALANGEAU. — Paris, Masson, 1968, 240 p.

Cet ouvrage, dix-septième de la série, comprend sept articles :

D. COMAR : Applications de l'analyse par radioactivation à la chimie médicale.

D. DEMAY : Semi-microvolumétrie en phase hétérogène. Applications analytiques.

L. FOISSAC : Détermination automatique du carbone, de l'hydrogène et de l'azote dans les substances organiques par une méthode dynamique.

J. HIRTZ : Les méthodes physico-chimiques d'analyse dans l'étude du métabolisme des médicaments.

M. PESEZ : Spectrofluorimétrie et analyse organique, nouvelle méthode d'analyse fonctionnelle.

S. VEIBEL : Les fonctions soufrées : détection, caractérisation, dosage.

P. ZUMAN : Quelques applications de la polarographie en chimie organique. (Some applications of polarography in organic chemistry).

PHILIPPE (J.). — LES MÉTHODES STATISTIQUES EN PHARMACIE ET EN CHIMIE. (APPLICATIONS A LA RECHERCHE, A LA PRODUCTION ET AU CONTRÔLE). — Paris, Masson et Cie, Collection Monographies de pharmacie, 1967, 378 p.

L'interprétation statistique des résultats expérimentaux est de plus en plus d'actualité et cet ouvrage préfacé par M. M. JANOT, membre de l'Institut, la traite à l'aide d'exemples simples en écartant la théorie mathématique.

L'ouvrage débute par un exposé sur les variations des données expérimentales, et les tests d'hypothèse, qui permettent d'étayer une décision. Viennent ensuite deux chapitres qui intéressent plus particulièrement le fabricant ou le contrôleur : le premier traite des cartes de contrôle et de leurs multiples applications au stade de la production ; le second des problèmes de l'échantillonnage, vus sous l'angle de l'inspection ou du contrôle des matières premières avant leur mise en fabrication, ou des produits finis avant acceptation par le laboratoire de contrôle.

Un chapitre traitant de l'analyse de variance, et un autre sur la corrélation et la régression entre deux variables, fournissent des notions suffisantes pour aborder des problèmes plus complexes comme l'expérimentation factorielle, simple ou fractionnée, la recherche d'un optimum ou l'amélioration des procédés de fabrication.

Le chapitre sur les plans d'expérimentation, destinés à diminuer l'erreur expérimentale par des arrangements qui relèvent souvent du simple bons sens, insiste sur la nécessité de prévoir, avant de mettre en route une série d'essais longs et coûteux, la manière dont les résultats seront ensuite exploités.

Enfin, un chapitre plus particulièrement consacré aux biologistes (microbiologistes ou pharmacologues) traite de l'exploitation des résultats obtenus sur un matériel vivant et de ce fait particulièrement soumis à des variations expérimentales difficiles à maîtriser.

TRÉMOLIÈRES (J.). — BIOLOGIE GÉNÉRALE, TOME 2, PHYSIOLOGIE CELLULAIRE. — Dunod, Paris, 1967, 412 pages.

Les données essentielles concernant le fonctionnement de la cellule sont rassemblées dans ce deuxième tome.

La première partie est consacrée à l'étude des organites cellulaires ; le noyau, le réticulum endoplasmique et les ribosomes sont considérés en fonction de leur rôle dans la biosynthèse des acides nucléiques. Un chapitre important est consacré à cette biosynthèse : étude des chromosomes tels qu'ils apparaissent au généticien et au biochimiste ; répartition des acides nucléiques dans la cellule ; biosynthèse de l'ADN, de l'ARN, et des protéines ; Code génétique constitué par les chaînes d'ADN dans les chromosomes et expliquant le phénomène génétique.

La mitochondrie, génératrice d'énergie par la synthèse de l'ATP aux dépens des déshydrogénations des substrats du cycle de Krebs et des acides gras. Le couplage des oxydations et des phosphorylations est la caractéristique de la mitochondrie.

Les lysosomes sont considérés comme des organites de catabolismes cellulaires intervenant par leurs enzymes hydrolytiques.

La deuxième partie est consacrée à l'étude de la cellule en tant qu'élément d'organisation élémentaire stable, capable de durer, de croître, de se multiplier en se renouvelant grâce à l'association des fonctions assurées par les organites cellulaires.

Elle constitue un système thermodynamique intégrant la biosynthèse, la bioénergétique, le catabolisme. L'étude de la multiplication cellulaire est suivie d'une application à la croissance d'une colonie bactérienne et des cellules dans un tissu organisé.

La dernière partie est consacrée aux dégénérescences cellulaires, aux effets des toxiques, aux réactions inflammatoires, à l'action des radiations, à la régénération tissulaire.

Chercheurs et étudiants trouveront dans ce manuel des bases utiles explicitées par de nombreux schémas.

M. F.

ECKARDT (F. E.). — FONCTIONNEMENT DES ÉCOSYSTÈMES TERRESTRES AU NIVEAU DE LA POPULATION PRIMAIRE. — Actes du Colloque de Copenhague, 1965. — Paris, UNESCO, 1968, 515 p.

Cet ouvrage regroupe 45 communications qui intéressent le monde végétal essentiellement, et que l'on peut regrouper de la façon suivante :

— Échanges de masse (CO_2 et H_2O) et d'énergie dans la biosphère (essentiellement dans l'air) et au sein de la végétation.

— Réponses physiologiques (photosynthèse, transpiration, croissance) aux conditions du milieu.

— Méthodes d'analyse de la production de matière sèche (racines et parties aériennes dans le cas des arbres notamment).

— Technique et méthode de mesure de la photosynthèse, de la transpiration et de certaines caractéristiques physiologiques (résistance stomatique à la diffusion de l'eau ...).

— Signification et technique de mesure de certaines grandeurs climatiques.

— Choix des sites expérimentaux.

Un grand nombre d'articles se rapportent aux végétaux cultivés ou aux forêts. La qualité des textes proposés et la clarté avec laquelle les discussions sont rapportées font de cet ouvrage un outil essentiel qui doit intéresser tous ceux dont l'activisé est en rapport avec la production des végétaux cultivés.

Comme dans les autres publications de l'UNESCO, les textes sont présentés soit en anglais (35), soit en français (10), avec des résumés dans l'autre langue.

P. C.

HERVIEU (J.). — CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DE L'ALLUVIONNEMENT EN MILIEU TROPICAL. — Bondy, O.R.S.T.O.M., Coll. Mémoires nº 24, 1968, 465 p.

Cet ouvrage représente un travail de thèse.

L'auteur a choisi les basses plaines alluviales de l'ouest et du nord-ouest de Madagascar (1 million et demi d'hectares) pour étudier la sédimentation d'origine continentale.

L'intérêt de cette étude réside dans le fait que l'auteur considère les bassins versants élargis, c'est-à-dire, qu'il remonte aux sources de l'alluvionnement dans les hauts plateaux.

Le plan est classique : les deux premières parties sont consacrées à l'étude du milieu naturel et des facteurs de la sédimentation (facteur climatique, cours d'eau, altération et pédogenèse).

La 3e partie est consacrée à l'étude des milieux de sédimentation : le lit des fleuves, les basses vallées, les mangroves et même une partie du plateau continental au débouché des fleuves.

La partie la plus intéressante est la dernière partie où l'auteur essaie de réaliser un bilan de l'alluvionnement :

Le premier bilan établi est quantitatif car il évalue les parts respectives de l'érosion (transport solide) et de l'altération (substances dissoutes). L'auteur constate une nette prédominance de l'érosion mécanique (45 mm par 1 000 ans) sur l'altération (3,7 mm/1 000 ans pour la roche saine ; 7,9 mm pour les roches d'altération ancienne). Ces résultats sont comparés à ceux obtenus dans le bassin de l'Amazonie.

En réalisant un deuxième bilan qualitatif, l'auteur constate comme on pouvait s'y attendre un simple héritage détritique : héritage textural et héritage minéralogique.

La sédimentation ne fait que classer les matériaux et l'on retrouve dans les alluvions les mêmes composants et en particulier les mêmes minéraux argileux que dans les matériaux de départ des hauts plateaux pratiquement sans transformation.

Les seuls facteurs d'évolution de ces sols des basses vallées alluviales sont l'hydromorphie et l'halomorphie.

L'auteur a choisi de couvrir par cette étude une très grande surface (3/4 de l'Ile) : on peut se demander si une étude plus fine réalisée sur un seul bassin versant n'aurait pas été plus fructueuse ?

De toutes façons, l'auteur a réalisé un travail de synthèse considérable qui intéressera aussi bien les géologues et les géographes que les pédologues chargés de la mise en valeur des basses plaines alluviales.

M. R.

CASTANY (G.). — PROSPECTION ET EXPLOITATION DES EAUX SOUTERRAINES. — Paris, Dunod, 1968, 740 p.

Les études de géologie stratigraphique et structurale sont à la base des méthodes de prospection des eaux souterraines. Complétées par l'établissement et l'interprétation de la surface piézométrique des nappes libres, elles permettent de déterminer les caractéristiques physiques et dimensionnelles des couches aquifères et de définir les structures hydrogéologiques. Le rôle important de la cartographie géologique est souligné dans ce livre.

Les techniques de détermination sur le terrain des caractéristiques hydrogéologiques (perméabilité et porosité efficace) et des facteurs de l'écoulement des eaux souterraines (gradient hydraulique et vitesse réelle) sont exposées. L'utilisation des traceurs y a sa place. L'étude des paramètres physico-chimiques de l'eau (température, résistivité, sels dissous) aboutit à des procédés de prospection décrits avec de nombreux exemples.

La méthodologie et les principes des prospections et des moyens d'exploration sont exposés à partir de cas concrets choisis dans des régions de types différents. L'accent est porté sur leur mise en œuvre et leurs possibilités d'utilisation. Un important développement est réservé aux inventaires des ressources en eaux, aux prospections géophysiques, aux sondages et au carottage électrique. Les techniques de la reconnaissance hydrogéologique par sondages sont décrites. La synthèse de toutes les données recueillies aboutit à la cartographie des eaux souterraines.

Cet ouvrage représente un guide pratique pour l'exécution des études hydrogéologiques, la conduite de la prospection et de l'exploration des eaux souterraines, l'exécution d'ouvrages de captages et la programmation de l'exploitation rationnelle des nappes.

J. L.

HAGAN (R. M.), HAISE (H. R.) and EDMINSTER (T. W.), ed. — IRRIGATION OF AGRICULTURAL LANDS. — Madison (Wisconsin), American Society of Agronomy, Monographs, nº 11, 1967, 1180 p.

Cette monographie est une mise au point de 62 articles, rédigés par 120 auteurs, pour la plupart américains.

Les sujets abordés dans cet ouvrage sont très divers et représentent une étude assez complète des problèmes liés à l'irrigation.

Les aspects théoriques, rédigés par des spécialistes mondialement renommés, sont particulièrement bien développés, tant en ce qui concerne l'étude théorique que la mesure des différents para-

mètres caractérisant les relations hydriques dans chacun des termes du continuum sol-plante-atmosphère. On peut citer notamment : la dynamique de l'eau dans le sol, dans la plante, les mécanismes de la circulation de l'eau dans le continuum, les bilans d'énergie liés à l'évapotranspiration donc aux besoins et aux disponibilités en eau des plantes et les réactions physiologiques qui en résultent. Les points de vue économiques (planification, économie de l'eau, sélection des zones à irriguer), les points de vue technologiques (prévision des besoins en eau, sources d'eau, méthodes et techniques de l'irrigation) ainsi que l'aménagement rural des zones à irriguer et ses conséquences agronomiques représentent aussi une part importante de l'ouvrage.

Plan de l'Ouvrage :

I — Introduction : historique et contexte social (2 articles, 22 pages) ;
II — Facteurs climatiques — (3 articles, 25 pages) ;
III — Sources d'eau pour l'irrigation — (4 articles, 69 pages) ;
IV — Sélection des zones à irriguer : économie et planification (2 articles, 64 pages) ;
V — Relations sol-eau — (5 articles, 110 pages) ;
VI — Relations plante-eau (6 articles, 117 pages) ;
VII — Relations sol-plante-eau (4 articles, 53 pages) ;
VIII — Évapotranspiration (4 articles, 91 pages) ;
IX — Prévision des besoins en eau (1 article, 27 pages) ;
X — Irrigation des principales cultures (13 articles, 161 pages) ;
XI — Systèmes d'irrigation — (6 articles, 150 pages) ;
XII — Aménagement rural et irrigation : aération du sol, drainage, lutte contre l'érosion, lutte contre le gel... (13 articles, 161 pages) ;
XIII — Économie de l'eau et irrigation (4 articles, 69 pages).

Cet ouvrage de synthèse devrait être précieux et utile à tous ceux qui s'intéressent aux problèmes posés par l'irrigation.

BLACK (C. A.). — SOIL PLANT RELATIONSHIPS, 2nd ed., New York, John Wiley and Sons, Inc., 1968, 792 p.

Cette seconde édition a été entièrement revue. Une plus grande importance a été donnée à l'utilisation de méthodes scientifiques dans les expériences sur les relations sol-plante et à la signification des mesures des propriétés du sol.

Comme dans la première édition, le sol est considéré en tant que substrat pour la croissance des plantes. Chaque chapitre de cet ouvrage comporte l'étude des propriétés du sol, et pour chacune des propriétés considérées, les relations sol-plante.

— Caractéristiques du sol : taille des particules, structure, composition minéralogique, profil du sol.

— L'eau dans le sol : mouvement de l'eau, capacité de rétention, évaporation, évapotranspiration, relation d'énergie dans l'absorption de l'eau par les plantes, relation sol-plante et eau assimilable, l'apport d'eau et le comportement des plantes.

— L'aération du sol : respiration, volume d'air dans le sol, diffusion de l'oxygène, réponse des plantes à l'aération du sol.

— Les bases échangeables : distinction entre bases échangeables et non échangeables, capacité et réaction d'échange des cations, les bases échangeables et la nutrition des plantes.

— L'acidité du sol : nature et développement de l'acidité du sol, acidité du sol et croissance des plantes.

— Salinité et excès de sodium : les sels solubles, dynamique des sols salins, relation sol-plantes.

— L'azote du sol : stabilité, minéralisation et immobilisation, oxydation de l'ammonium et réduction des nitrates, assimilation de l'azote par les plantes, les engrais azotés, apport d'azote et comportement des plantes.

— Le phosphore et le potassium du sol : pertes du sol par les cultures, le lessivage, l'érosion, formes du phosphore et du potassium dans le sol, assimilation par les plantes, les engrais, apport en phosphore et en potassium et comportement des plantes.

M. F.

DEMOLON (A.). — CROISSANCE DES VÉGÉTAUX CULTIVÉS. — 6e éd. Paris, Dunod, 1968, 590 p.

La sixième édition de la *Croissance des végétaux* de A. DEMOLON vient de paraître, ce qui prouve le succès de ce livre.

La cinquième édition avait paru en 1954 ; elle avait été préparée par l'auteur lui même, à la veille de sa mort, survenue en octobre 1954.

Le texte n'en a pas été modifié, mais il a semblé nécessaire à un certain nombre d'élèves de A. DEMOLON de compléter quelques chapitres sur des questions ayant progressé depuis 1954.

C'est ainsi qu'ont été ajoutés quelques compléments en ce qui concerne l'évapotranspiration, la fumure échelonnée de l'azote, la culture en vases, la dynamique de la nutrition végétale, l'alimentation en soufre des végétaux, etc.

L'ouvrage ainsi complété se trouve donc mis à jour sans que soient modifiés l'esprit dans lequel l'auteur l'a conçu et la présentation qui ont assuré le grand succès de la *Croissance des végétaux* qui, depuis 1934, est avec la *Dynamique du sol* du même auteur, le guide indispensable pour tous ceux, agronomes et praticiens, qui veulent baser leur action sur la connaissance scientifique des faits.

P. B.

BAYENS (J.). — LA NUTRITION DES PLANTES DE CULTURE. — Préface de P. BOISCHOT. — Université de Louvain, Institut pédologique, 1967, 682 p., 38 diagrammes, 41 photos couleur, rés. angl. et all.

L'auteur, directeur de l'Institut pédologique de l'Université, résume dans cet ouvrage ses recherches entreprises dans le domaine de la physiologie appliquée aux plantes de culture en rapport avec le sol.

Les chapitres concernant le système radiculaire des plantes cultivées dans les différents sols, ses conceptions sur l'interaction phosphore-sol, l'importance des substances de croissance dans le sol pour les plantes cultivées, constituent selon l'auteur des acquisitions pour les sciences agronomiques. En outre, il pose plusieurs problèmes encore non résolus dans le domaine des plantes de culture en rapport avec le sol. L'ouvrage, dans son ensemble, est nouveau en ce sens qu'il essaye de jeter un pont entre le sol, le climat et la productivité des plantes de culture. Il essaye de donner une explication de l'action des engrais dans le sol avant qu'ils soient assimilés par la plante agricole.

LE POTASSIUM ET LA QUALITÉ DES PRODUITS AGRICOLES. Compte rendu complet du VIIIe Congrès de l'Institut international de la Potasse, tenu à Bruxelles (Belgique) en octobre 1966. — Berne, Institut international de la Potasse, 1968, 597 p. textes en langues originales : allemand, anglais, espagnol, français.

« Le potassium et la qualité des produits agricoles » a constitué l'un des thèmes principaux d'étude de l'Institut international de la Potasse au cours des dernières années. Le VIIIe Congrès de l'Institut international de la Potasse, tenu à Bruxelles en octobre 1966, a justement eu pour objet de porter la discussion des problèmes de fumure et de qualité des produits agricoles devant des assises plus largement ouvertes que celles des colloques régionaux de Morat, Lisbonne et Belgrade, organisés sur le même sujet.

Le « Potassium Symposium 1966 », compte rendu des exposés et discussions du Congrès de Bruxelles, comporte cinq parties :

— une introduction sur les conditions actuelles de l'agriculture belge ;
— la fumure de la betterave à sucre ;
— la fumure des plantes ornementales ;
— la fumure des cultures maraîchères ;
— des exposés de synthèse sur le potassium et la qualité des plantes cultivées, et la fumure et la santé des êtres humains.

J. L.

GAY (T. R. G.) and PARKINSON (D.), ed. — THE ECOLOGY OF SOIL BACTERIA. — An international symposium, Liverpool University Press, 1968, 681 p.

Cet ouvrage contient trente-cinq communications traitant des sujets suivants :

— L'environnement des bactéries du sol : environnement physique, chimique, biologique et agronomique.

— Méthodes d'isolement et d'études de l'activité des bactéries du sol : techniques de culture, de communication et de mesure du métabolisme microbien dans le sol.

— Physiologie des bactéries du sol, avec entre autres les communications de :
D. PRAMER : Synthèse des bactéries hétérotrophes du sol ;
H. G. SCHLEGEL : Les réactions chimiolithotrophes des bactéries du sol ;
M. ALEXANDER : Dégradation des pesticides par les bactéries du sol.

— La taxonomie des bactéries du sol. Taxonomie numérique et notion de Gram dans la classification.

J. W. ROUATT : Classification nutritionnelle des bactéries du sol et leur valeur en écologie.

— Bactéries dans la rhizosphère des plantes.

G. FAHRAEUS et H. LJUNGGREN : Phase de pré-infection des bactéries symbiotiques des légumineuses ;

N. A. KRASILNIKOV. Désinfection du sol par les microorganismes.

— Croissances des bactéries du sol.

D. A. VAN SCHREVEN et G. W. HARMSEN : Les bactéries du sol en relation avec le développement des polders dans les régions du Zuider Zee ;

A. J. HOLDING et D. C. JEFFREY : Effet des ions métalliques sur les bactéries du sol ;

G. A. ZAVARZIN : les bactéries et le métabolisme du manganèse ;

J. E. CROSSE : Bactéries pathogènes du sol ;

F. A. SKINNER : Bactéries anaérobies du sol ;

F. E. CHASE : Bactéries nitrificatrices du sol.

Chaque communication est suivie d'une liste complète de références. L'ouvrage se termine par un index auteur, un index par micro-organismes, un index sujet.

M. F.

NELSON (L. B.), ed. — CHANGING PATTERNS IN FERTILIZER USE. Proceedings of a symposium sponsored by the Soil Science Society of America and held at the Palmer House in Chicago, Illinois, February 14 and 15, 1968. — Madison (Wisconsin), Soil Science Society of America, 1968, 466 p.

Cet ouvrage contient 17 articles qui font le point sur différents problèmes de fertilisation. Les 6 premiers sont consacrés à des articles généraux :

— Statistiques et possibilités d'emploi des engrais ;
— Efficacité agronomique de différents engrais ;
— Distribution et commerce des engrais ;
— Méthodes d'application des engrais ;
— Détermination des besoins en engrais ;
— Relations plantes-sol ;

Les 11 autres traitent de la fumure du maïs, du sorgho-grain, du coton, des céréales, du soja, des plantes fourragères, des cultures légumières, des vergers, de la betterave et de la canne à sucre, et du riz.

CENTRE NATIONAL D'ÉTUDES ET D'EXPÉRIMENTATION DE MACHINISME AGRICOLE.—DICTIONNAIRE TECHNIQUE DE LA MÉCANISATION AGRICOLE : FRANÇAIS-ANGLAIS-ALLEMAND-ESPAGNOL-ITALIEN. T. 1. — Antony, C.N.E.E.M.A., 1968, 250 p.

En 1959, le Centre national d'Études et d'Expérimentation de Machinisme agricole (CNEEMA) a publié un Dictionnaire technique du Machinisme agricole trilingue — français, anglais, allemand. La première édition de cet ouvrage venant à être épuisée, le CNEEMA a préféré reprendre totalement le contenu de ce dictionnaire en le complétant considérablement et en adjoignant deux langues supplémentaires : l'espagnol et l'italien. C'est ainsi qu'est né le Dictionnaire technique de la Mécanisation agricole.

Ce nouvel ouvrage ne se borne pas aux aspects purement machinistes. Il a été conçu dans l'esprit de faciliter la lecture de tout article ou document traitant de problèmes agricoles ou mécaniques. Il tient compte des termes normalisés, mais aussi des habitudes de langage propres aux techniciens.

Le Dictionnaire technique de la Mécanisation agricole comprendra 3 tomes :

— le tome 1, de 250 pages, comporte 36 300 termes, soit 7 000 mots en moyenne par langue ; il traite des sujets agricoles et mécaniques en général (termes généraux, économie, gestion, unités, mécanique générale, carburants et lubrifiants) ainsi que des moteurs, tracteurs et motoculteurs, et de leurs organes essentiels ;

— le tome 2, en préparation, sera un peu plus important que le tome 1 ; il traitera des diverses machines agricoles et de leurs organes ;

— le tome 3, en préparation également, présentera en 5 fascicules, les répertoires alphabétiques par langue des 17 000 mots qui figureront dans les tomes 1 et 2.

PLAISANCE (G.). — DICTIONNAIRE DES FORÊTS. — Paris, La Maison rustique, 1968, 214 p.

Ce dictionnaire donne les définitions de termes relatifs aux forêts, aux arbres, à la technologie, à l'aspect du bois et des souches en forêt, à l'exclusion d'autres sujets connexes (chasse, droit forestier, zoologie, maladies..) qui lui auraient donné un volume trop important.

Cet ouvrage rendra service aux techniciens de la forêt, et aux propriétaires forestiers qui ont besoin de connaître la définition d'un terme rencontré dans un ouvrage technique ou dans un texte officiel.

L.

RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 27, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles séparées seront utilisées pour les références bibliographiques, les tableaux, les légendes des figures et graphiques.

Au début de chaque mémoire, on indiquera : — *le titre du mémoire* : il ne devra pas comporter d'abréviations ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs,* précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; — *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de... ; — *le nom de l'établissement* dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

Les mémoires seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :

a) *sommaire* : résumé suffisamment précis pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction,* dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé,* en donnant sous une forme concise, tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; *résultats,* à présenter de la manière la plus brève possible ; e) *discussion et conclusion* ; f) *résumé* destiné à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour les collaborations, les fonds, les dons... ; h) *références bibliographiques.*

Les travaux originaux en anglais doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français très *complet.* Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

Pour les autres documents (notes, mises au point, revues, rapports, etc.) l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

Les références bibliographiques doivent être citées dans le texte de la manière suivante : (DUPONT et DUVAL, 1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de : et *al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

Pour les articles : le (s) nom (s) de (s) auteur (s) suivi (s) des initiales du (des) prénom (s) ; la date de parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses, de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatre langues mentionnées) ; le titre du périodique en abrégé, selon le *World-List of Scientific Periodicals,* ou le *Bulletin Signalétique du C. N. R. S.* ; le volume ; la première et la dernière page de l'article.

Pour les ouvrages : le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés, et, si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera en plus le nom de l'auteur du chapitre cité, le nom des rédacteurs principaux, précédé de la mention « in » le titre de l'ouvrage.

La mention « communication personnelle » ou « données non publiées », etc., doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d'« Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies, doivent être fournis à part. Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérotations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponibles est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit. Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur une feuille séparée, et porter les numéros des figures.

Les graphiques, schémas, cartes, dessins d'appareils seront envoyés *à l'état de projets,* leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5, *soit* × 0,25.

Il est rappelé que le format utile des Annales est : 16 × 24 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

Photographies : Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos 9 × 12, 4 photos 9 × 5,5, 6 photos 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible après clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur feuilles séparées et porter les numéros des figures.

Correction des épreuves : les auteurs recevront une épreuve à corriger.

Envoi du manuscrit : M. HÉNIN, Centre national de Recherches agronomiques, 78 - Versailles, France. On demande deux exemplaires.

Le Directeur de la publication : M. L. CAGNAC.

Imprimerie Bussière à Saint-Amand (Cher), France. — 12-1968.

Dépôt légal : 4e trimestre 1968. N° d'impression : 2753.

ANNALES
AGRONOMIQUES

VOLUME 19 1968 NUMÉRO 5

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE
149, rue de Grenelle-PARIS-7e

Reproduction, même partielle, interdite sans autorisation des auteurs et de l'nstitut national de la Recherche agronomiqne, â l'exception des sommaires et des résumés

Ann. agron., 1968, **19** (5), 511-539.

JUXTAPOSITION DE SOLS NOIRS, TRÈS RICHES EN MATIÈRE ORGANIQUE, ET DE SOLS BRUNS ACIDES SUR LEUCOGRANITES DANS LA RÉGION D'EYMOUTIERS — PEYRAT - LE - CHATEAU (HAUTE - VIENNE)

J. DEJOU, J. GUYOT, J. MORIZET

avec la collaboration technique de Colette CHAUMONT et R. MILLET

Station agronomique, 36 - Châteauroux
Institut national de la Recherche agronomique

SOMMAIRE

La région d'Eymoutiers-Peyrat-le-Château, située à l'extrémité Sud-Est du département de Haute-Vienne, est caractérisée par un ensemble très hétérogène de sols reposant tous sur des leucogranites ; on peut observer, en toute situation topographique et quelle que soit la végétation, une juxtaposition de sols noirs, exceptionnellement riches en matière organique, et dont la présence constitue presque une curiosité, avec des sols bruns acides classiques en domaine cristallin, tandis que des types bruns foncés, intermédiaires quant à l'intensité de leur coloration et de la teneur en matières organiques, servent de terme de transition.

INTRODUCTION

Lors d'une précédente publication (1967), nous avons déjà signalé la présence de sols noirs très riches en matières organiques dans la région d'Eymoutiers-Peyrat-le-Château à l'extrémité sud-est du département de la Haute-Vienne, au contact de la Creuse et de la Corrèze. Rappelons que c'est à la demande de la Chambre d'Agriculture de Limoges et aussi de M. Dupoux, Directeur de la ferme du Lycée agricole des Vaseix que nous en avons entrepris l'examen, afin d'en déterminer les principaux caractères physico-chimiques et les potentialités agronomiques.

La zone prospectée se situe, comme le précise la figure 1, à quelques 45 km à l'est de Limoges, et comprend essentiellement les communes de Peyrat-le-Château, Augne, Saint-Amand-le-Petit et Eymoutiers ; ce territoire relativement restreint, puisque ses dimensions aussi bien dans le sens nord-sud que ouest-est n'excèdent pas 8 km, est compris entre les vallées de la Maulde au nord et celle de la Vienne au sud.

Ce territoire, entièrement occupé par un massif arénisé de leucogranites, appartient à la partie ouest du Plateau de Millevaches dont la pétrographie très complexe vient d'être précisée par J. LAMEYRE (1966). Il s'agit de leucogranites de transition suivant l'expression de cet auteur, avec les schistes cristallins voisins appartenant au Limousin et décrits en détail par M. CHENEVOY (1958).

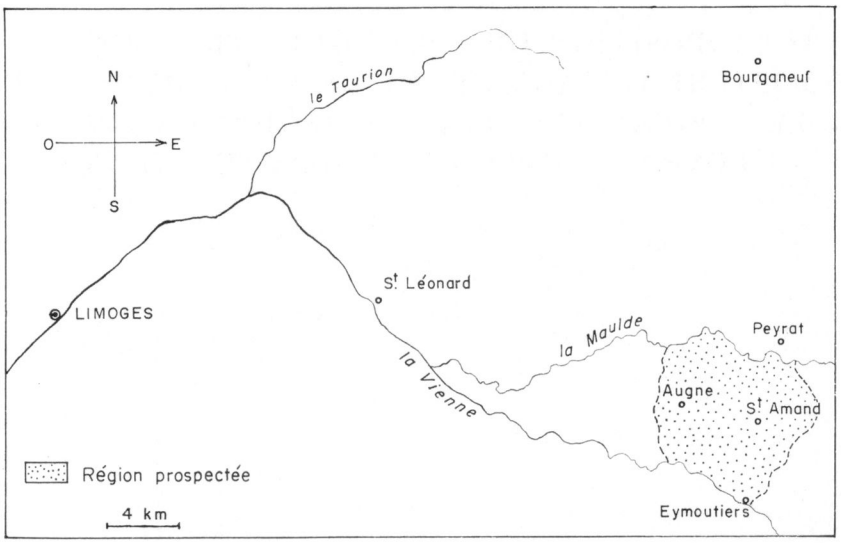


FIG. 1. — *Croquis de situation*

La limite entre les plateaux du Limousin et celui du Millevaches est parfaitement soulignée par l'importante fracture occupée par des mylonites dans la région de Saint-Julien-le-Petit, Sainte-Anne et Domps ; elle constitue le prolongement direct de la grande faille d'Argentat, accident majeur dans la tectonique du Massif Central.

Au point de vue topographie, la région est relativement accidentée ; elle est constituée par une succession de mamelons en forme de pustules, très typiques dans le paysage et dont l'altitude est comprise entre 550 et 600 m (exemples : Négrignas près de Augne : 550 m, Artigeas : 539 m, Serre : 607 m). Les versants sont plus ou moins accusés et articulés avec des fonds de vallons relativement étroits où les altitudes peuvent descendre à 450 m. Enfin, le socle granitique est profondément entaillé par deux rivières : la Vienne, qui coule au fond d'une gorge depuis Eymoutiers à Verviale, limite de notre zone de prospection, suivant une orientation Sud-Est-Nord-Ouest, et son affluent, la Maulde, possédant un cours aussi encaissé et presque parallèle, avant de s'infléchir vers l'Ouest.

APERÇU GÉOLOGIQUE

Tous les sols qui feront ultérieurement l'objet de nos préoccupations reposent sur un massif de leucogranites ayant la forme d'un rectangle très étiré depuis Peyrat-le-Château jusqu'à Argentat en Corrèze, soit sur une longueur de plus de 80 km,

tandis que sa largeur n'atteint que rarement 20 km. Rappelons que le terme de leucogranite créé par Ph. D. A. JOHANNSEN (1949) vient d'être proposé par J. LAMEYRE (1966) pour désigner dans le Massif Central français une série de roches, parmi lesquelles les granites à 2 micas ou anciennes « granulites », caractérisées d'une manière fondamentale par « leur faible teneur en minéraux sombres ».

Les leucogranites de la zone prospectée apparaissent dans leur ensemble relativement homogènes dans leur texture et leur structure ; ce sont des roches claires à tendance porphyroïde, certains feldspaths potassiques atteignant presque 1 cm ; parfois, l'on décèle une orientation assez nette des cristaux. On note également au sein de ces leucogranites, la présence d'enclaves de teinte sombre.

La structure est typiquement grenue et les roches sont caractérisées dans la majorité des cas, et surtout dans les échantillons de Charapoux et de Augne, d'une part, par une intense cataclase due au contact de la grande fracture de Saint-Julien-le-Petit-Domps, et d'autre part, par la présence de Sillimanite, caractéristique des leucogranites de transition au contact des schistes cristallins. L'examen microscopique de plusieurs échantillons recueillis dans l'ensemble de la zone étudiée indique une composition minéralogique identique qui est la suivante :

— quartz ;
— feldspaths potassiques ;
— albite-Oligoclase ;
— biotite ;
— muscovite ;
— apatite ;
— sillimanite ;
— minéraux opaques, rares.

CLIMATOLOGIE

Les indications de la normale calculée sur 30 années d'observation — 1921 à 1950 — et qui sont consignées au tableau 1, donnent une pluviométrie totale de 980 mm. Il s'agit donc d'une région à climat humide, où les précipitations peuvent d'ailleurs largement dépasser ce chiffre moyen, et atteindre comme en 1960, 1 700 mm;

TABLEAU 1

Pluviométrie d'Eymoutiers (Haute-Vienne)
Données de la normale (en mm)

Normale (1921-1950)	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Total
	85	80	75	85	90	65	75	75	70	90	100	90	980

il faut aussi souligner, et ceci est fort important pour l'agriculture locale, que leur répartition est satisfaisante tout au long de l'année et que l'on ne relève pas de saison

vraiment sèche d'une durée prolongée. Toutefois, notons que ces données pluviométriques ont été recueillies à Eymoutiers situé à 461 mètres d'altitude et que des nuances doivent apparaître en fonction de l'altitude.

Quant à la température moyenne annuelle, mesurée à Limoges (294 m) distant de 45 kilomètres à l'Ouest — car il n'y a pas de résultats localement — elle est de 10°5 ; mais il est permis de supposer, toujours en raison de l'altitude et aussi de l'orientation des versants, qu'elle doit être légèrement inférieure dans le secteur étudié.

ÉTUDE PÉDOLOGIQUE

Le trait le plus frappant dans le territoire prospecté, où l'on rencontre côte à côte des terres labourées, des prairies naturelles et des forêts de feuillus et de résineux, est la juxtaposition très hétérogène d'une série de sols aux teintes très contrastées,

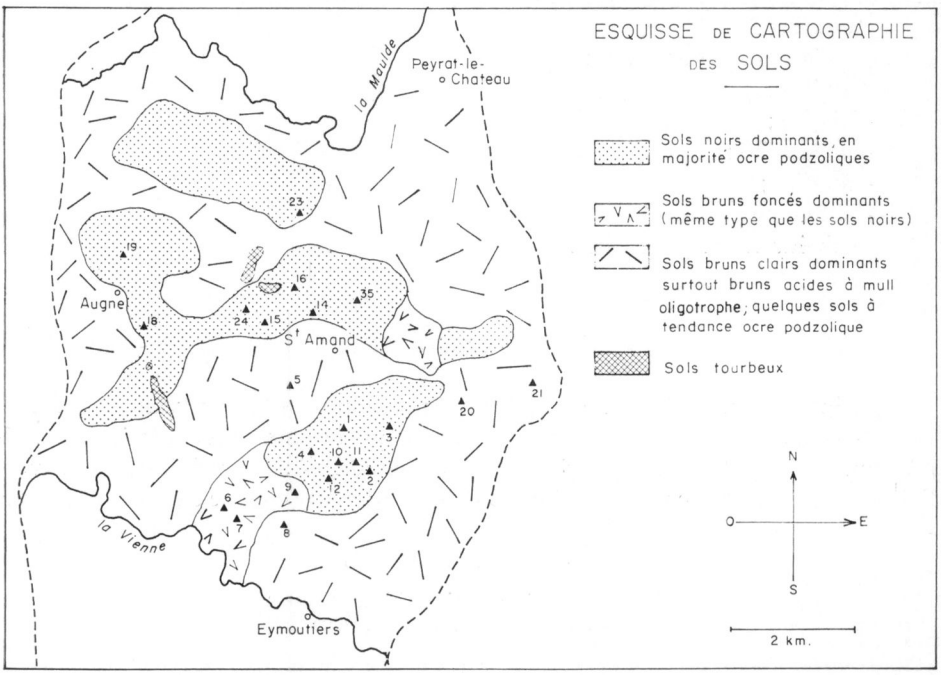


FIG. 2. — *Esquisse de cartographie des sols*

en relation directe avec l'importance de la matière organique. Leur répartition géographique apparaît sur la figure 2 et montre trois catégories essentielles de profils.

1. *Des sols noirs*, et qui le paraissent d'autant plus à la suite d'une période d'humidité, notés en général 5 YR 2/1 au code Munsell pour un échantillon ressuyé, très riches en matières organiques (plus de 10 p. 100 en moyenne). Leur observation est facile en plusieurs situations, en particulier le long de la route Eymoutiers-Saint-

Amand-le-Petit, à la hauteur du village du Rabaseix, et surtout le long d'une autre route qui vient d'être créée, immédiatement au nord de Saint-Amand-le-Petit.

2. *Des sols bruns foncés* intermédiaires entre les sols noirs et les sols acides quant à l'intensité de leur coloration et qui servent de termes de transition. Les indications moyennes du code Munsell donnent 10 YR 2/2 et leur teneur en matières organiques est de 5,6 p. 100. On les rencontre surtout autour des hameaux du Rabaseix et de la Sauterie et jusqu'à la rive droite de la Vienne.

3. *Enfin, des sols bruns acides* que l'on peut subdiviser en deux groupes distincts : les uns à profil uniforme, de couleur claire, tout à fait classiques en domaine cristallin, et d'autres présentant un horizon (B) ocre.

La coloration moyenne de tous les horizons Ap est 5 YR 3/3 et la teneur en matières organiques n'est plus que 2,7 p. 100.

La répartition géographique des sols bruns est très hétérogène.

4. Citons pour clore cet inventaire, *quelques sols tourbeux*, au fond de dépressions.

Si les régions qui viennent d'être citées sont caractérisées par un type de profil particulier nettement dominant, il y a dans la majorité des situations, juxtaposition possible des trois catégories de sols. Et, fait assez remarquable pour être bien souligné, il n'est pas rare que dans la même parcelle, de superficie souvent réduite (moins d'un hectare), il soit facile d'observer les trois types fondamentaux, auxquels le passage de l'un à l'autre peut s'effectuer suivant des transitions ménagées ou au contraire de façon brutale. Citons des exemples saisissants autour de Augne, ou à proximité du prélèvement n° 19, qui est un sol très noir, récolté dans une terre de labour, on passe en quelques mètres, à une série de sols bruns très clairs ; les mêmes observations peuvent être notées près des hameaux de la Vialle et du Rabaseix et le long de la route Augne-Eymoutiers.

Les conditions générales de la pédogenèse, hormis peut-être la végétation ne paraissent pas fournir d'arguments valables pour rendre compte d'une telle différenciation de profils : tous sont localisés sur la même roche-mère ; le climat, eu égard à la faible superficie examinée, est également identique et ses variations ont été partout les mêmes dans le passé. Quant à la topographie, elle ne semble pas influer davantage pour imposer tel ou tel type de profils : les sols noirs, par exemple, se rencontrent aussi bien au sommet des mamelons où la forêt est prédominante, que sur les versants plus ou moins accentués, les bas de pentes, les replats et fonds de vallons.

DESCRIPTION DE PROFILS TYPES

A l'intérieur de chaque catégorie de profils, on observe de grandes analogies, les différences essentielles tenant à la profondeur variable des sols, pour laquelle l'intervention de la topographie se révèle fondamentale. Souvent, au sommet des nombreux mamelons, les sols sont relativement peu épais (de l'ordre de 20 cm) et occupés, soit par la forêt, soit par la lande à Callune, tandis que leur profondeur s'accroît au bas des pentes grâce aux apports colluvionnaires. Aussi bien la description de quatre profils correspondant à chacune des catégories définies suffira pour en donner la physionomie caractéristique.

1° *Étude d'un sol noir : profil n° 23* (fig. 3)

Il est situé à Subertange, près de Peyrat-le-Château, le tableau (annexe 1), donnant toutes les indications quant à sa localisation ; les prélèvements ont été exécutés dans une terre de labour.

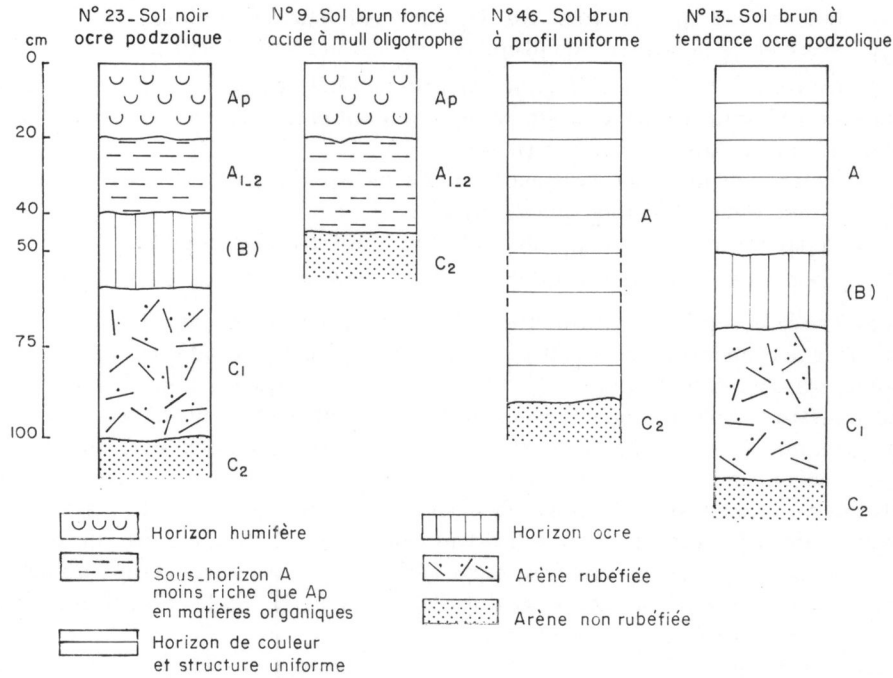


FIG. 3. — *Sols sur leucogranites*

Les horizons sont les suivants :

— *Ap (0-20 cm)* : 10 YR 2/1, mais dans la plupart des sols 5 YR 2/1, très noir, contenant 10,8 p. 100 de matière organique. Excellente structure grumeleuse, texture sablo-limoneuse, avec quelques fragments de leucogranites ayant résisté à l'arénisation. La matière organique est bien amalgamée à la matière minérale, mis à part des radicules plus ou moins décomposés. L'activité biologique, assez importante d'ordinaire dans de tels sols, paraît ici peu élevée si l'on en juge par le petit nombre de vers de terre. Les racines des végétaux cultivés pénètrent très facilement tout le long de cet horizon.

— A_{1-2} *(20-40 cm)* : 7,5 YR 4/4, avec encore 2,8 p. 100 de matière organique. La texture est identique à celle de l'horizon précédent, mais la structure est plus massive avec une très légère tendance polyédrique, se résolvant rapidement en grumeaux de petite dimension.

— (B) *(40-60 cm)* : on passe brusquement à un horizon de couleur ocre, 7,5 YR 5/6 mais dont la composition granulométrique est très voisine de celles des horizons supérieurs. Il peut être considéré comme la base du sol.

— C_1 *(60-100 cm)* : 10 YR 6/8. Cet horizon correspond à la partie supérieure de l'arène, rubéfié sur 40 cm d'épaisseur. Sa structure est plus grossière et le taux d'argile

tombe brusquement de 12 p. 100 dans la zone (0-60 cm) à 5 p. 100 avec une augmentation corrélative des pourcentages des fractions 50-200 μ et 200-500 μ.

— C_2 (*au-delà de 100 cm*) : il s'agit d'une arène classique, non affectée par l'évolution ferrugineuse de l'horizon C_1, de couleur claire : 10 YR 8/3, mais il n'est pas possible d'en préciser la profondeur, aucune coupe ne permettant de l'apprécier. Le taux d'argile s'abaisse encore jusqu'à 3,2 p. 100, tandis que la fraction sableuse s'accroît, en relation avec la diminution d'intensité de la désagrégation physique.

Il s'agit donc, en résumé, d'un sol humifère reposant sur une arène granitique rubéfiée et dont la migration de l'argile et du fer est très faible, comme le précisent les examens analytiques.

Différenciations au sein des sols noirs.

Comme nous l'avons déjà souligné, les différences entre profils résident dans la profondeur et en particulier dans l'épaisseur des horizons A, comprenant toujours deux sous-horizons Ap et A_{1-2} ; ils représentent à eux deux 35 cm en moyenne. Cependant, des sols tout à fait remarquables méritent d'être mentionnés. Citons en particulier le profil 1 des Plaines, exceptionnel il est vrai, où l'horizon A atteint 45 cm et dans lequel la zone 35-45 cm contient encore 7,7 p. 100 de matière organique, et le profil 11, près du Rabaseix où ce même horizon atteint 50 cm avec 2,75 p. 100 de matière organique à ce niveau.

2° *Examen d'un sol brun foncé : profil n° 9* (fig. 3)

Il a été observé au Rabaseix, sur une ligne de faîte, en position quasi-horizontale, et les prélèvements ont été exécutés dans un champ cultivé.

La description du profil ressemble à celle des sols noirs, dont il se différencie de façon fondamentale par la diminution du taux de matière organique en surface.

On note les horizons suivants :

— *Ap* (*0-20 cm*) : de couleur foncée, 10 YR 2/2, toujours sur échantillon ressuyé contenant 6,35 p. 100 de matières organiques. Texture sableuse. Bonne structure grumeleuse.

— A_{1-2} (*20-45 cm*) : 10 YR 5/3. Même structure que l'horizon Ap avec une composition granulométrique quasi-identique. Structure légèrement plus compacte. Le taux de matières organiques est 2,1 p. 100, mais on note la présence de poches où cette teneur doit être plus élevée.

— C_1 (*à partir de 45 cm*) : 10 YR 6/4 ; on atteint l'arène granitique qui n'est pas rubéfiée dans ce profil ; le taux d'argile qui était de 13 p. 100 dans les horizons supérieurs, tombe à 6 p. 100. Il y a donc, au niveau de l'arène, la même discontinuité granulométrique que celle observée dans les sols noirs.

— Absence d'horizon B dans ce profil.

3° *Les sols bruns acides*

a) *Sols bruns acides à profil uniforme.*

Ce sont les sols les mieux représentés parmi ce groupe, la proportion de ceux qui présentent un horizon (B) étant nettement plus réduite.

La disposition des profils est semblable à celle décrite sur socle granitique dans la région de Bessines (Haute-Vienne) (J. DEJOU et coll., 1966). Les exemples sont nombreux dans le secteur prospecté, en particulier autour d'Artigeas, de Roziers, et surtout au croisement des routes Eymoutiers-Bujaleuf et Augne-La Ribière. C'est ici qu'a été observé le profil n° 46 considéré comme le plus représentatif de cet ensemble de sols.

Description du profil n° 46 (fig. 3).

Il est situé sur un replat de terrain, portant une prairie naturelle. Il comporte simplement un horizon A épais (90 cm), de couleur claire uniforme, 5 YR 3/3, avec une texture et une structure en tout point identiques à celles des sols noirs et des sols foncés. Les racines des espèces prairiales pénètrent très facilement dans ce matériau meuble, aucun obstacle ne venant s'interposer sur leur parcours.

On découvre l'arène claire vers 90 cm, sans horizon rubéfié.

b) *Sols présentant une différenciation d'horizon* (B)*: profil 13* (fig. 3).

L'exemple retenu a été choisi à proximité du cimetière de Saint-Amand-le-Petit sur une prairie naturelle.

On note les horizons suivants :

— *A (0-60 cm) :* couleur brune, 7,5 YR 4/4, de teinte uniforme, texture sableuse et bonne structure grumeleuse. Excellente pénétration des racines. Teneur en matières organiques : 1,38 p. 100.

— (B) *(50-70 cm) :* légèrement ocre 5 YR 4/8, mais avec absence de migration d'argile et de fer.

— C_1 *(70-110 cm) :* arène très rubéfiée avec nombreux fragments de granite et d'enclaves dioritiques en voie d'altération-5 YR 4/8.

— C_2 *(110-250 cm) :* arène non rubéfiée 10 YR 5/4, avec filons de quartz recoupant la formation.

Conclusions à cette étude de profils
Place des sols dans la classification

Ces quelques descriptions suffisent à montrer les profondes analogies existant dans la morphologie des profils sur leucogranites de la région ; c'est essentiellement la teneur en matière organique qui permet en définitive une différenciation, teneur s'extériorisant parfaitement par la couleur des sols aisément reconnaissable.

Il apparaît à la lumière de ces observations, que la genèse des profils est assez complexe. Il est possible en effet de formuler l'hypothèse suivante : trois épisodes auraient présidé à leur formation :

1. une arénisation des granites, plus ou moins intense ;

2. une phase marquée par les phénomènes d'altération et d'oxydation de la partie supérieure des arènes qui affecte également la base de nombreux sols, et déterminée lors d'une période à climat chaud et humide, sans doute relativement récente ; cette zone de 30 à 60 cm d'épaisseur, correspond ainsi à des paléosols qui se distinguent des sols actuels par la composition granulométrique ;

3. une troisième phase, subactuelle, où s'est élaboré le sol et où la matière organique a pu s'accumuler.

Il est assez difficile, il faut l'avouer, de ranger les différents types de profils décrits dans la classification pédologique d'AUBERT et Ph. DUCHAUFOUR. Les sols noirs et beaucoup de sols bruns foncés cultivés, sont de type A (B) C dominant, l'horizon (B) se caractérisant surtout par sa couleur ocre. On ne note aucune migration d'argile de A vers (B), ou si elle apparaît, elle est extrêmement réduite, donnant un coefficient d'entraînement ne s'élevant pas au-dessus de 1,2-1,3, ce qui ne permet pas de caractériser un horizon textural ou argilique net. Les examens analytiques ne décèlent pas non plus de migration de fer libre. Bref, hormis la couleur, les caractères morphologiques de l'horizon (B) sont proches de ceux de la base de l'horizon A où la matière organique a fortement diminué. De plus, la valeur du rapport C/N de l'horizon A demeure toujours peu élevé, oscillant entre 11 et 13, atteignant rarement 14, ce qui ne manque pas de surprendre en zone forestière ou occupée par la lande à Callune. En dépit de son épaisseur et de son acidité (pH compris entre 4,6 et 5,2), cet humus est biologiquement assez actif, comme l'atteste la présence de vers de terre ; il est bien amalgamé à la matière minérale, mais sa minéralisation est sans doute très faible, puisqu'il a pu s'accumuler depuis longtemps et que sa consommation et sa destruction sont des plus réduites. Il semble donc que l'on se trouve en présence d'un moder-mullique, avec les caractères d'un mull oligotrophe.

En raison de certains aspects morphologiques assez nets, il est plausible d'avancer que ces sols forment une série continue allant des types bruns acides aux types ocre podzoliques, ces derniers étant largement dominants.

Quant aux sols bruns contenant 2,7 p. 100 de matière organique, avec un C/N voisin de celui des sols noirs, ou bruns foncés, il faut distinguer comme nous l'avons vu, deux groupes :

— les sols à profil uniforme peuvent être classés dans les types bruns acides à mull oligotrophe ;

— ceux caractérisés par la présence d'un horizon (B) plus ou moins marqué, mais toujours très insuffisamment pour donner un horizon de type textural, où l'on n'enregistre par ailleurs aucune migration d'argile et de fer, se trouvent sans doute aux premiers stades d'une podzolisation et sont, malgré la présence de mull oligotrophe, peut-être proches des types à tendance ocre podzolique, décrits par C. DUTHION et J. CHRÉTIEN dans les Basses-Vosges (1966), assez voisins en définitive des sols bruns acides.

DISCUSSION DES RÉSULTATS ANALYTIQUES

1° *Propriétés physiques des sols*

Analyses granulométriques (tabl. 2).

Celui-ci résume les données moyennes des compositions de la terre fine pour les trois types de sols considérés.

Dans les horizons (0-20 cm) correspondant à la couche labourée, on note, dans les trois catégories de profils, de grandes analogies, surtout entre les sols noirs et les sols bruns foncés, les différences dans les taux de matière organique étant compensées chez ces derniers, par une teneur légèrement plus élevée en fractions fines, argile et

TABLEAU 2

Comparaison des compositions granulométriques de la fraction < 2 mm

	Nombre échantillons examinés	Terre fine (%) moyenne	Composition de la terre fine (sol séché à 105°C)					
			Argile < 2 µ	Limon 2-20 µ	Sables très fins 20-50 µ	Sables fins 50-200 µ	Sables grossiers 200-2 000 µ	Matière organique (%)
Types de sols			1) *Sols* (*horizon : 0-20 cm*)					
Sols noirs Eymoutiers-Peyrat	10	88,9	13,6	15,9	5,9	11,4	41,6	10,7
Sols bruns foncés intermédiaires entre les sols noirs et les bruns acides	3	85,0	15,8	17,1	7,0	11,8	41,9	5,6
Sols bruns acides classiques en domaine granitique	5	88,9	11,2	12,3	6,4	13,9	53,4	2,7
Types de sous-sols			2) *Sous-sols* (*horizon : 20 à 35-40 cm*)					
Sous-sols noirs typiques	10	90,0	13,8	17,0	6,3	11,3	48,4	3,75
Sous-sols bruns foncés intermédiaires	3	82,6	18,2	17,1	6,6	10,3	44,7	2,7
Sous-sols bruns acides.....	4	87,5	14,0	12,4	5,8	13,1	51,9	1,45
Types d'arènes			3) *Partie supérieure des arènes* (*horizon : 50-100 cm*) (souvent zone intermédiaire entre le sol et l'arène franche)					
Correspondant aux sols noirs typiques	9	85,5	7,9	11,1	5,4	11,6	62,1	
Correspondant aux sols bruns foncés.....	1	77,0	6,0	9,2	4,0	9,4	70,3	
Correspondant aux sols bruns acides	3	89,6	8,0	9,1	5,2	16,9	59,3	

Remarque : Certains profils contiennent encore au sein de l'arène de la matière organique. Ex. profils 1 et 2 : 1,9 et 0,77 p. 100.

limon. Par contre, la constitution granulométrique des sols bruns acides s'écarte quelque peu de celles des autres sols, car la fraction des sables grossiers est plus riche d'environ 10 p. 100.

Lorsqu'on aborde le sous-sol (20-40 cm), mise à part la fraction matière organique, la composition granulométrique ne varie encore que très faiblement et cela dans les trois types de profils ; ce qui exclut ici tout lessivage. Par contre, dans la partie inférieure des arènes (50-100 cm) qui est en réalité une zone intermédiaire entre le sol et l'arène franche, le pourcentage de l'argile diminue brusquement, environ de moitié, avec une augmentation corrélative des sables grossiers. Le phénomène s'accuse encore davantage dans l'arène proprement dite, où la teneur d'argile s'abaisse de 3 à 5 p. 100, traduisant la diminution rapide de l'altération physique quand on passe des sols aux arènes. Les remarques formulées à ce sujet à propos du massif de la Pierre-qui-Vire — J. DEJOU et G. PÉDRO (1967) — demeurent donc valables.

Matières organiques (tabl. 3, 4 et 5).

TABLEAU 3

Taux de C et N de la matière organique

Numéros échantillons	Profondeurs en cm	Types de sols	C total % de terre	N total ‰ de terre	C/N M. O. totales
EY 1-1	0-20	Sol noir cultivé	6,36	5,41	11,7
1-2	30-35		4,36	3,73	11,7
1-3	35-45		4,30	3,37	12,7
EY 19-1	0-25	Sol noir cultivé	5,61	4,36	12,9
19-2	25-35		2,27	1,47	15,4
19-3	45-60		1,04	0,96	10,8
EY 11-1	3-25	Sol noir de landes	6,30	4,31	14,6
11-2	25-35		1,94	1,31	14,8
11-3	35-50		1,60	1,06	15,1
EY 24-1	0- 3	Sol noir de forêt	14,83	8,47	17,5
24-2	3- 8		8,79	5,81	15,1
24-3	10-30		4,89	3,43	14,3
EY 20-1	0-30	Sol brun acide (pré)	1,73	1,65	10,5
20-2	30-50		1,22	1,30	9,4

Leur examen revêt en la circonstance une importance majeure et nous ne donnerons pour l'instant que des indications préliminaires, réservant à plus tard la publication d'une autre note où elle sera étudiée d'une manière plus détaillée.

Le tableau 2 nous paraît justifier notre classification des sols en fonction du taux de matières organiques. Il est curieux d'ailleurs de souligner qu'à l'intérieur d'un même type de profils, pour les échantillons examinés, on n'enregistre que des variations infimes de pourcentage et qu'il ne semble exister pratiquement aucun terme de transition entre sols noirs et bruns foncés, pas plus qu'entre ces derniers et les sols bruns acides. Par exemple, sur 10 échantillons de sols noirs examinés, les

TABLEAU 4

Fractionnement densimétrique de la matière organique de la région d'Eymoutiers - Peyrat-le-Chateau (Haute-Vienne)

Densité de la liqueur de fractionnement : 1,75

N° échantillons	Profondeurs en cm	Types de sols	C libre		C lié		N libre		N lié		C/N	
			% de terre	% de C total	% de terre	% de C total	‰ de terre	% N total	‰ de terre	% N total	M. O. libres	M. O. liées
EY 1-1	0-20	Sol noir	0,62	9,2	5,74	90,2	0,37	6,9	5,04	93,1	16,8	11,4
1-2	30-35	cultivé	0,31	7,0	4,05	93,0	0,19	5,2	3,54	94,8	16,3	11,4
1-3	35-45		0,30	7,0	4,00	93,0	0,14	4,1	3,23	95,9		12,4
EY 19-1	0-25	Sol noir	0,97	17,2	4,64	82,8	0,37	8,6	3,99	91,4	26,2	11,6
19-2	25-35	cultivé	0,20	8,7	2,07	91,3	0,06	4,0	1,41	96,0		14,6
19-3	45-60		0,05	5,8	0,93	94,2	0,01	1,0	0,95	99,0		10,3
EY 11-1	3-25	Sol noir	0,99	15,6	5,31	84,4	0,33	7,8	3,98	92,2	30,0	13,3
11-2	25-35	de landes	0,12	6,2	1,82	93,8	0,03	2,2	1,28	97,8		14,2
11-3	35-50		0,08	5,0	1,52	95,0	0,02	1,7	1,04	98,3		14,6
EY 24-1	0- 3	Sol noir	8,23	55,5	6,60	44,5	4,65	54,8	3,68	45,2	17,9	17,3
24-2	3- 8	de forêt	2,52	48,6	6,27	51,4	1,13	21,2	4,58	78,8	18,8	13,6
24-3	10-30		0,76	15,4	4,13	84,6	0,33	15,3	2,90	84,7	23,0	14,2
EY 20-1	0-30	Sol brun	0,08	4,3	1,65	95,7	0,03	1,8	1,62	98,2		10,2
20-2	30-50	acide (pré)	0,03	2,3	1,19	97,7	0,01	0,7	1,29	99,3		9,2

TABLEAU 5

Fractionnement densimétrique de la matière organique de la région d'Eymoutiers - Peyrat-le-Chateau (Haute-Vienne)

Densité de la liqueur de fractionnement : 2

N° échantillons	Profondeurs en cm	Types de sols	C libre		C lié		N libre		N lié		C/N	
			% de terre	% de C total	% de terre	% de C total	‰ de terre	% N total	‰ de terre	% N total	M. O. libres	M. O. liées
EY 1-1	0-20	Sol noir	1,86	29,2	4,50	70,8	1,24	23,0	4,17	77,0	15,0	10,8
1-2	30-35	cultivé	0,93	21,2	3,43	78,8	0,61	16,5	3,12	83,5	15,2	11,0
1-3	35-45		0,58	13,5	3,72	86,5	0,21	6,2	3,16	93,8		11,7
EY 19-1	0-25	Sol noir	3,07	54,8	2,54	45,2	1,98	45,3	2,38	54,7	15,5	10,7
19-2	25-35	cultivé	0,46	20,2	1,81	79,8	0,16	11,0	1,31	89,0		13,8
19-3	45-60		0,07	6,8	0,97	93,2	0,02	2,0	0,94	98,0		10,3
EY 11-1	3-25	Sol noir	3,50	55,7	2,80	44,3	1,98	46,0	2,33	54,0	17,7	12,0
11-2	25-35	de landes	0,25	12,8	1,69	87,2	0,09	6,7	1,22	93,3		13,8
11-3	35-50		0,19	12,0	1,41	88,0	0,10	9,5	0,96	90,5		14,7
EY 24-1	0- 3	Sol noir	12,45	84,0	2,38	16,0						
24-2	3- 8	de forêt	6,40	72,8	2,39	27,2						
24-3	10-30		2,86	58,4	2,03	41,6						
EY 20-1	0-30	Sol brun	0,20	11,4	1,53	88,6	0,15	9,0	1,50	91,0	13,3	10,2
20-2	30-50	acide (pré)	0,08	6,3	1,14	93,7	0,04	3,0	1,26	97,0		9,0

valeurs du taux de matières organiques sont toutes comprises entre 9,25 p. 100 et 11,6 p. 100 tandis que pour 5 échantillons de sols bruns, ces mêmes valeurs oscillent entre 1,36 p. 100 et 3,5 p. 100.

Il faut aussi remarquer que le pourcentage exceptionnellement élevé de la matière organique dans les sols noirs se retrouve aussi bien dans les champs cultivés que sur les parcelles en friche, occupées par la lande à Callune. Ce taux est encore très important en profondeur puisque sa moyenne se situe à 3,75 p. 100 à 40 cm, alors qu'elle est de 2,7 p. 100 et 1,45 p. 100 pour les autres sols. Ce n'est qu'au-delà de 60 cm qu'elle disparaît, quand on approche du sommet de la zone arénisée, et même quelques profils en contiennent encore à ce niveau, du fait des infiltrations abondantes (ex. profils 1 et 2).

L'examen du rapport C/N est également intéressant (tabl. 3). Dans les types bruns acides, il est voisin de 10, traduisant un taux d'humification élevé ; il s'élève peu dans les sols noirs cultivés où il est compris entre 11 et 13 ; il s'accroît par contre assez sensiblement dans les sols de landes et surtout sous forêt : 17,5 pour l'horizon A_0 du profil 24. L'humification est alors beaucoup moins poussée.

Nous avons aussi procédé au fractionnement densimétrique de la matière organique, suivant la technique proposée par G. MONNIER et coll. (1962) en utilisant deux liqueurs de densité différente : 2 et 1,75, cette dernière donnant une séparation plus sélective de la partie « libre ». Les résultats figurent dans les tableaux 4 et 5 et appellent de notre part les réflexions suivantes :

1. en limitant notre comparaison d'abord aux sols cultivés, on peut, grâce aux deux techniques dont les renseignements sont concommittants, distinguer, d'une part les sols bruns acides où le taux de C libre est relativement faible dans les horizons de surface, du même ordre que celui cité par G. MONNIER (1965), indiquant qu'il ne subsiste ici que peu de résidus organiques non humifiés, et les sols noirs où ce même taux est beaucoup plus élevé ; il est en effet de 3 à 5 fois supérieur en choisissant la liqueur de densité 2, et de 2 à 4 fois avec celle de densité 1,75. La même remarque s'applique d'ailleurs à la fraction N libre.

2. D'autre part, il ne faut pas manquer de souligner les analogies profondes dans la composition de la matière organique de certains sols noirs cultivés et des sols de landes à Callune, et cela sur l'ensemble du profil. Les exemples du profil 19 qui est cultivé et 11 occupé par la lande, sont à cet égard, très significatifs, les taux de C libre étant très voisins dans chacun des 3 niveaux examinés. Nous avons ainsi, grâce à l'analyse, la confirmation des observations que l'on peut recueillir sur le terrain.

3. Si l'on s'adresse aux sols forestiers, la fraction C libre augmente considérablement, au point de représenter dans l'échantillon 24 récolté dans une sapinière assez récente, 84 p. 100 du C total, avec la liqueur de densité 2 et 55,5 p. 100 avec celle de densité inférieure.

4. Les rapports C/N sont classiquement plus élevés pour les fractions libres que pour les fractions liées et ces valeurs s'élèvent parfois de façon sensible pour les parties extraites avec la liqueur de faible densité ; en effet, la séparation étant ainsi plus complète, il ne reste dans la partie libre que la matière organique très peu humifiée dont le C/N est toujours plus élevé, tandis que des produits à caractère mixte passent dans la partie liée, en augmentant la valeur de cette donnée.

Mais, le problème le plus complexe, et sans doute le plus déroutant, est celui de l'origine de cette matière organique pouvant s'accumuler sur une épaisseur courante de 30 cm et décelable encore à 60 cm dans certaines situations. Et surtout, pourquoi sa répartition dans l'espace, aussi hétérogène, ne semble obéir à aucune loi définie ? Peut-être faut-il songer à des zones défrichées depuis longtemps et récupérées sur la forêt ou sur la lande ? La similitude de l'architecture des profils et de la composition globale de la matière organique fournit un argument en faveur de cette hypothèse. Quoi qu'il en soit, il s'agit d'un humus stable, bien amalgamé à la fraction minérale et dont l'évolution est très lente, puisque deux sols, situés côte à côte au Rabaseix, l'un (n° 11) en friche avec bruyères et fougères, et l'autre régulièrement cultivé depuis près de 100 ans (n° 12) fournissent des teneurs totales comparables sur les 40 premiers centimètres du profil.

Des examens plus approfondis viendront, nous l'espérons, compléter ces informations relatives à la matière organique, et en particulier une étude palynologique en cours à l'heure actuelle fournira peut-être des éclaircissements sur le problème complexe de sa genèse.

Stabilité structurale.

Quelques déterminations des indices Is et K de S. HENIN et coll. (1958) ont été exécutés. Les valeurs de log 10 Is pour l'horizon (0-20 cm) varient entre 0,5 et 0,74, tandis que pour log 10 K, elles oscillent entre 1,81 et 2,16. On constate un excellent groupement de tous les points figuratifs dans la représentation graphique classsique log. 10 Is — log. 10 K, traduisant une bonne stabilité structurale, tant pour les sols noirs que pour les bruns acides ; nous retrouvons ici la même particularité que dans les sols de Bessines-Laurière (J. DEJOU et coll., 1966). Cette stabilité est due à la présence de la matière organique et aussi à l'importance de la fraction sableuse (200-2 000 μ) exerçant une influence favorable sur le comportement des agrégats vis-à-vis de l'eau.

Réserves en eau.

Elles ont été déterminées sur 4 échantillons de sols noirs et sur 1 sol brun acide, le détail des résultats figurant sur le tableau 6.

Il est certain que ces données n'ont qu'une valeur indicative en raison de leur nombre trop limité et de l'incertitude du choix de la profondeur réellement exploitable du sol. Ici, il nous a paru cependant logique d'effectuer les calculs des réserves en eau jusqu'au niveau 60 cm, contenant parfois encore de la matière organique, et susceptible donc d'être colonisé par les racines. On remarque que la valeur de la capacité au champ des sols noirs est toujours élevée, en raison de la haute teneur en matières organiques, et qu'elle diminue sensiblement dans l'échantillon de sol brun acide. Dans tous les cas, les réserves en eau sont assez bonnes et supérieures à celles mesurées dans le secteur granitique de Bessines-Laurière.

Conclusions.

Il apparaît que les sols d'Eymoutiers-Peyrat-le-Château sont dotés de propriétés physiques intéressantes : profondeur assez satisfaisante, richesse en matière organique, excellente structure, bonne perméabilité, réserves en eau moyennes ; ils

TABLEAU 6

Calcul des réserves en eau de quelques profils

N° échantillons et nature du sol	Profondeurs	Capacité au champ (% de T. S.)	Point de flétrissement permanent (% de T. S.)	Humidité utile	Densité apparente	Réserves (mm d'eau)
4 Terre noire	0-10	25,2	13,8	11,4	0,90	10,2
	10-20	25,9	13,2	12,7	0,90	11,4
	20-40	16,3	6,1	10,2	1,15	23,4
	40-60	16,3	6,1	10,2	1,30	22,6
					Total.....	67,6
12 Terre noire	0-25	22,0	9,9	12,1	1,15	34,8
	25-35	20,4	8,8	11,6	1,05	12,2
	35-60	14,0	6,3	7,7	1,45	28,0
					Total.....	75,0
19 Terre noire	0-25	31,0	14,3	16,7	1,0	41,7
	25-40	24,2	10,4	13,8	1,15	23,8
	40-60	22,4	9,4	13,0	1,30	33,8
					Total.....	99,3
20 Sol brun acide	0-30	17,8	7,7	10,1	1,15	34,8
	30-60	18,7	7,0	11,7	1,30	45,6
					Total.....	80,4
23 Terre noire	0-20	28,4	13,7	14,7	1,0	29,4
	20-35	21,4	8,6	12,8	1,15	22,1
	35-60	16,6	6,0	10,6	1,30	34,5
					Total.....	86,0

peuvent être travaillés à tout moment ; l'agriculteur ne peut redouter dans les cas de sols insuffisamment profonds que les méfaits de la sécheresse.

2° *Propriétés chimiques*

pH.

Tous les profils quels qu'ils soient, sont franchement acides, mais les valeurs les plus faibles enregistrées intéressent les sols de landes. L'intérêt du chaulage est ici évident, pour réactiver la matière organique, et des applications régulières de calcaire broyé sont conseillées, suivant les doses de l'ordre de 1 000 à 1 500 kg/ha tous les 3 ans.

Capacité d'échange (tabl. 7).

Elle permet, tout comme le fractionnement densimétrique, de séparer distinctement deux groupes : sols noirs d'une part et sols bruns acides de l'autre, auxquels nous rattachons les sols foncés intermédiaires. En effet, dans les premiers, la capacité d'échange se situe en moyenne autour de 20 méq. pour 100 g dans l'horizon humifère (0-20 cm) et décroît plus ou moins rapidement dans les horizons inférieurs, tandis que pour les autres sols, elle n'atteint que la moitié de cette valeur. La proportion d'argile étant assez voisine dans l'ensemble des profils, cette différence est imputable à la matière organique, dont le rôle est ici déterminant.

Quant aux taux de saturation S/T, ils oscillent entre de larges limites, même dans les sols cultivés et la distinction entre les deux groupes de sols n'est plus possible par ce critère. En effet, ce rapport dépend essentiellement de la quantité de Ca échangeable, extrêmement variable d'une terre à l'autre, et en relation avec l'intensité de l'altération des plagioclases, mais surtout de la fréquence des chaulages. Il peut être très faible, 7,1 p. 100, comme dans le profil 2 récupéré sur la lande, ou atteindre 80 p. 100 dans le profil 9. Par contre, les sols de landes ou développés sous forêt ont un taux de saturation très faible, de l'ordre de 10 p. 100.

Mg échangeable (tabl. 7).

Il est curieux de constater une variabilité considérable dans les valeurs de Mg échangeable. Parfois, il est totalement absent de l'horizon Ap, et présent dans les horizons sous-jacents, ce qui peut laisser redouter des carences en cet élément. Certains profils en sont même totalement dépourvus, en particulier le n° 11 qui est un sol de lande, et le n° 20 qui est une prairie naturelle.

K_2O échangeable (tabl. 8).

Dans les sols noirs cultivés, le taux de K_2O échangeable indique des terres moyennement pourvues, alors que les sols bruns acides seraient assez déficients en cet élément ; mais nous ne disposons que d'un nombre insuffisant d'analyses pour conclure d'une manière définitive. Quoiqu'il en soit, la dispersion des résultats, très accusée, reflète les différences des fertilisations potassiques variables d'une ferme à l'autre. Certains sols nécessiteraient des apports immédiats en cet élément, en particulier les n° 21, 51, 201 et 211.

Acide phosphorique (tabl. 8).

Tout comme pour les sols de Bessines-Laurière, nous avons procédé aux trois déterminations proposées par R. Blanchet et coll. (1963) : P_2O_5 assimilable suivant

TABL

Analyses chimiques des sol

N° échantillons	Profondeur (en cm)	pH-H^2O	Fe libre (%)	C (‰)	N total (‰)	C/N
11	0-20	5,35	1,06	59,0	5,0	11,7
12	20-35	5,10	1,02	51,7	4,43	11,5
13	35-45	4,40	0,98			
14	50-80	5,15	0,84			
21	0-20	4,8	0,53	60,2	4,55	13,2
22	20-35	4,9	0,70	11,5	0,8	14,2
23	35-50	4,9	0,44			
31	0-20	5,9		53,7	4,6	11,6
32	25-40	4,7		11,4	0,95	12,0
91	0-20	5,7		36,9	3,11	11,8
92	20-45	5,35		12,5	0,92	13,5
93	45-60	6,2				
10-1	0-20	4,6				
10-2	20-30	4,5				
10-3	30-60	4,7				
10-4	60-90	5,4				
11-1	0-20	4,7	0,73	63,0	4,30	14,6
11-2	25-35	4,7	0,73	19,4	1,30	14,8
11-3	35-50	4,7	0,66	16,0		
11-4	70-80	4,7	0,35			
19-1	0-25	5,3		56,1	4,36	12,9
19-2	25-35	4,7		22,7	1,47	15,4
19-3	45-60	4,7		10,4	0,96	10,8
20-1	0-30	4,6	0,55	17,3	1,65	10,5
20-2	30-50	4,5	0,68	12,2	1,30	9,4
20-3	90-120	5,2	0,68			
23-1	0-20	5,4		62,7	4,4	14,2
23-2	20-30	5,0		16,1	1,2	13,1
23-3	40-60	4,45		7,4	0,8	9,5
23-4	60-80	4,6				
23-5	100-120	5,25				
24-1	0-3	3,9	0,73	148,3	8,50	17,5
24-2	3-8	4,0	0,80	88,0	5,80	15,1
24-3	10-30	4,6	0,72	48,9	3,43	14,3
24-4	30-40	5,0	0,84			
24-5	50-70	4,9	0,95			
35-1	3-40	4,5	0,80			
35-2	40-50	4,9	0,67			
35-3	50-65	4,9	0,64			
35-4	65-85	5,2	0,50			
35-5	85-100	5,1	0,40			

ÉAU 7

l'Eymoutiers — Peyrat-le-Château

C.E.C en méq. pour 100 g	Bases échangeables en méq. pour 100 g				Somme des bases S en méq. pour 100 g	S/C.E.C
	Ca	Mg	K	Na		
20,6	4,6	0,25	0,32	0,10	5,27	25
15,6	1,5	0,10	0,18	0,07	1,85	11,8
19,3	0,8	0,3	0,19	0,08	1,37	7,1
8,8	0,05	0,05	0,05	0,06	0,23	2,7
20,8	9,5	0,7	1,34	0,18	11,7	56,3
11,8	0,9	0,1	0,20	0,07	1,87	10,8
10,3	6,4	0,7	0,95	0,13	8,18	80
5,1	1,6	traces	0,27	0,08	1,95	38,2
2,4	0,8	traces	0,05	0,10	0,95	39,5
			0,24			
			0,17			
18,70	1,62	traces	0,14	0,24	2,0	10,7
9,35	0,25	traces	0,07	0,13	0,45	4,8
20,80	10,10	traces	0,45	0,19	10,74	51,7
13,00	0,50	0,12	0,18	0,20	1,01	7,9
8,70	0,25	0,50	0,12	0,12	0,99	11,2
8,6	1,40	traces	0,09	0,11	1,60	18,6
8,1	0,25	traces	0,05	0,08	0,38	4,7
6,1	0,37	traces	0,07	0,12	0,56	9,2
19,0	7,0	traces	0,87	0,27	8,84	46,5
6,1	0,2	traces	0,05	0,08	0,33	5,4
4,8	0,1	traces	0,05	0,07	0,22	4,6
3,5	0,1	traces	0,05	0,07	0,22	6,3
1,7	0,1	traces	0,06	0,08	0,14	8,2
47,3	4,5	traces	0,54	1,56	6,60	13,9
22,9	0,12	0,25	0,07	0,18	0,62	2,7
18,0	0,37	traces	0,12	0,12	0,61	3,4
10,0	0,12	0,37	0,05	0,10	0,64	6,6
18,1	0,50	0,50	0,14	0,11	1,25	6,9
11,3	0,50	0,37	0,08	0,09	1,04	9,1
7,3	0,75	0,37	0,06	0,10	1,28	17,4
5,2	0,85	0,50	0,05	0,08	1,48	28,0

TABLEAU 8

Analyses chimiques des sols d'Eymoutiers — Saint-Amand-le-Petit (suite)

N° échantillons	Profondeur en cm	P_2O_5 ‰ Dyer	P de la solution du sol en mg/l	Concentrations obtenues avec apports de		Pouvoir absorbant	K_2O ‰
				250 γ P	500 γ P		
11	0-20	0,15	0,05				0,12
12	20-35	0,07	0,03				0,07
21	0-20	0,02	0,02				0,07
22	20-35	0,01	0,01				0,03
31	0-20	0,34	0,06				0,50
32	25-40	traces	0,02				0,08
41	0-10	0,42	0,08	0,08	0,11	Très fort	0,16
42	10-20	0,10	0,04	0,04	0,04	—	0,14
43	30-60	0,05	0,02				
51	0-20	0,02	0,05			Assez fort	0,09
52	20-40	0,01	0,03	0,07	0,17	—	0,09
53	40-50	traces	0,02				
71	0-20	0,07	0,04	0,47	1,66	Faible	0,18
72	20-35	0,02	0,01				0,10
91	0-20	0,12	0,04	0,03	0,05		0,37
92	20-45	0,02	0,03				0,10
101	0-20	0,13	0,03			Très fort	0,10
102	20-30	0,02	0,01				0,08
103	30-60	0,03	0,01				

TABLEAU 8 (suite)

N° échantillon	Profondeur en cm	P_2O_5 ‰ DYER	P de la solution du sol en mg/l	Concentrations obtenues avec apport de		Pouvoir absorbant	K_2O ‰
				250 γ P	500 γ P		
111	0-20	0,05	0,02				
112	25-35	0,05	0,01				0,06
113	35-50	0,08	0,04			—	0,03
121	0-25	0,06	0,02	0,03	0,03	Très fort	0,21
122	25-35	0,02	0,01	0,01	0,01	—	0,10
123	40-60	0,01	0,01	—	—		
191	0-25	0,27	0,03	0,04	0,06		0,18
192	25-35	0,06	0,01	0,02	0,03	Très fort	0,07
193	45-60	0,15	0,01	0,01	0,02		0,05
201	0-30	0,03	0,03	0,07	0,11	Assez fort	0,04
202	30-50	0,03	0,01	0,03	0,05	à fort	0,02
211	0-20	0,34	0,04	0,20	0,46	Moyen	0,06
212	20-40	0,30	0,03	0,07	0,13	à	0,06
213	45-60	0,13				assez fort	
231	0-20	0,13	0,03				0,34
232	20-30	0,01	0,01				0,02
233	40-60	0,01	traces				
241	0- 3						0,21
242	3- 8						0,04
243	10-30						0,05
244	30-40						0,02
351	3-40						
352	40-50						
353	50-65						

la méthode DYER, P de la solution du sol et pouvoir adsorbant avec deux additions de P, 250 γ et 500 γ.

Les résultats montrent une extrême variabilité du stock de P_2O_5 assimilable, en relation avec les apports effectués par les agriculteurs. Si certains sols sont bien pourvus, d'autres sont gravement carencés : exemple n° 21, 51, 121, 201. Il est à noter que 3 d'entre eux étaient aussi déficients en potasse. C'est dire que la fertilisation phospho-potassique est négligée dans les 3 situations.

La solution du sol est pauvre en P, mais le pouvoir adsorbant peut-être considéré comme moyen à assez fort, en relation avec l'abondance de la matière organique, ce qui confirme les résultats enregistrés sur les sols granitiques de Bessines-Laurière.

VALEUR AGRONOMIQUE DES SOLS D'EYMOUTIERS-PEYRAT-LE-CHATEAU

Dans l'examen de ce problème, il faut distinguer, d'une part les sols noirs auxquels on peut rattacher les types bruns foncés intermédiaires, et d'autre part les sols bruns acides.

Les sols noirs, comme nous l'a montré l'étude des propriétés physiques, ont à leur actif un certain nombre de qualités appréciables. A l'exception des sommets des mamelons où le granite peut affleurer, leur profondeur est dans l'ensemble assez satisfaisante ; ils sont toujours très sains (à l'exception de quelques tourbières) même en situation de fond de vallon où le plan d'eau se localise parfois autour de 80 cm, comme dans le profil des Plaines. Ils ne posent donc pas de problème de structure, et les façons culturales peuvent être exécutées facilement. De plus, ils reçoivent des précipitations assez régulières durant toute l'année. Cependant, les rendements de culture sont extrêmement variables. Bien sûr, il faut faire état des difficultés d'accès, dans certaines situations, imputables au relief accusé qui gêne considérablement les façons culturales et empêche les agriculteurs d'apporter à leurs terres tous les soins désirables. Mais les différences observées sont surtout dues à la fertilisation dont le niveau varie d'une ferme à l'autre. Quand les sols sont convenablement amendés et reçoivent des fumures minérables suffisantes, assurant une réserve de P_2O_5 et K_2O normale (exemple n° 19 à Augne), ils sont susceptibles de donner des récoltes très valables, tant en plantes sarclées : pomme de terre, betterave fourragère, carotte, rutabaga, navet, topinambour, qu'en cultures fourragères : prairies naturelles, ou entrant dans l'assolement. Seigle et avoine peuvent aussi donner des rendements intéressants ; par contre, la culture du blé paraît plus aléatoire, sans doute parce que l'acidité du sol est trop forte. Mais lorsque les conditions de fertilisation rationnelle ne sont pas remplies, le développement des cultures est entravé et les rendements diminuent dans une notable proportion. Ainsi, s'explique, semble-t-il, l'aspect si hétérogène d'une même culture, à la même époque de son cyle végétatif.

Une question qui paraît fort importante dans ce secteur, est celle de la fumure azotée, pour laquelle nous n'avons à l'heure actuelle que bien peu de renseignements. A l'avenir, nous nous proposons de l'examiner, grâce à des essais tendant à réactiver la matière organique dont la minéralisation semble très ralentie. Sans doute, une libération d'azote de cet énorme stock disponible serait susceptible d'être bénéfique aux cultures.

Aussi ne partageons-nous pas le point de vue assez pessimiste de quelques praticiens qui désespèrent quelque peu de l'avenir des sols noirs. Leur mise en valeur est peut-être délicate, mais elle n'est pas impossible.

Quant aux types bruns acides, leurs potentialités agronomiques sont celles de beaucoup de sols granitiques observés en Morvan ou en Limousin. Elles sont fonction essentiellement de la profondeur disponible pour l'enracinement, qui règle aussi l'importance des ressources hydriques. Lorsque cette condition est remplie, un assolement céréalier est possible. Ailleurs, il est préférable de songer à la prairie temporaire rompue en fin de végétation par une plante sarclée. Mais, comme pour les sols noirs, et avec plus d'acuité encore, se pose pour ces sols bruns, le problème de la fertilisation, absolument fondamental, pour que les agriculteurs puissent tirer le meilleur parti de leurs potentialités qui ne s'avèrent que moyennes.

Reçu pour publication en juin 1968.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à exprimer nos plus vifs remerciements aux Services de la Chambre d'Agriculture de Limoges, et en particulier à MM. JALOUX, BALOCHE et KERYELL, qui nous ont guidé dans la région, et nous ont apporté leur précieuse collaboration tout au long de cette étude. Nos remerciements s'adressent également à M. DUPOUX, Professeur au Lycée agricole des Vaseix, qui nous a fait profiter de sa grande connaissance du pays et dont le concours nous a été fort précieux.

SUMMARY

JUXTAPOSITION OF BLACK SOILS, VERY RICH IN ORGANIC MATTER, AND BROWN ACID SOILS ON LEUCOGRANITES IN THE EYMOUTIERS — PEYRAT-LE-CHATEAU REGION (HAUTE-VIENNE)

The region of Eymoutiers-Peyrat-le-Château (Haute-Vienne) which lies between the valleys of the Vienne and its tributary, the Maulde, touching the Millevaches table-land, is characterized by a very heterogeneous juxtaposition of soils all having a leucogranitic socle as parent rock. Irrespective of topography and vegetation the following soils are intimately associated with no apparent system of distribution :

a) *Black soils*, very rich in organic material (an average 10 p. 100 in the first 20 cm), the majority of which are type A (B) C, horizon (B) being characterized particularly by its ochre colour. These form a continuous series from brown, acid types to the largely dominant podzolic ochre types.

b) *Dark brown acid soils*, general type AC, with an organic content of about 6 p. 100.

c) *Brown, acid soils with uniform profile and oligotrophic mull* also of type AC, but the average organic content is reduced to 2.5-3 p. 100. Some of these have a more or less marked (B) horizon, and are possibly related to types having podzolic ochre tendency.

The origin of the black soils raised great difficulty. Do they derive from zones reclaimed and recovered from forest or heath? Their development will be equally difficult. as the mineralization of the organic matter would seem to have slowed down greatly. However, it may be that they will give satisfactory crops when there is sufficient mineral supply.

ZUSAMMENFASSUNG

NACHBARSCHAFT SCHWARZER, AN ORGANISCHER MATERIE SEHR REICHER BÖDEN UND BRAUNER, SAURER BÖDEN AUF ZWEIMIKAGRANITEN IM GEBIET VON EYMOUTIERS-PEYRAT-LE-CHATEAU (HAUTE-VIENNE)

Das zwischen den Tälern des Vienne-Flusses und seines Nebenflusses die Maulde liegende und in Kontakt mit der Millevaches-Hochebene stehende Gebiet von Eymoutiers-Peyrat-le-Château, ist durch eine sehr heterogene Nebeneinanderstellung der Böden gekennzeichnet, die alle als Muttergestein einen zweimikagranitischen Sockel haben. Ohne Rücksicht auf die topographische Lage und auf das Wachstum, findet man eng verbunden, ohne eine sichtbare Verteilungsordnung :

a) *Schwarze Böden*, sehr reich an organischer Materie (10 p. 100 durchschnittlich in den ersten 20 cm), meistens vom Typus A (B) C. Ihr Horizont (B) ist besonders durch seine Ockerfärbung gekennzeichnet. Sie bilden eine ununterbrochene Folge, ausgehend von sauren, braunen Typen bis zu den stark überwiegenden, ockerfarbigen, podzolischen Böden ;

b) *Braune, saure, dunkelfarbige Böden*, meistens vom Typus AC, mit einem Gehalt von etwa 6 p. 100 an organischer Materie ;

c) *Saure, braune Böden mit gleichmässigem Profil und oligotrophischem Mull*, ebenfalls vom Typus AC, aber mit einem Gehalt von durchschnittlich 2,5-3 p. 100 an organischer Materie. Einige von ihnen weisen einen mehr oder weniger ausgeprägten Horizont (B) auf, und sind vielleicht den Typen mit ockerfarbiger, podzolischer Tendenz nahe.

Die schwarzen Böden stellen sehr schwierige genetische Probleme dar. Gehen sie auf die Ausrodung und Urbarmachung des Waldes oder der Heide zurück ? Ihre Aufwertung ist auch schwierig, da die Mineralisierung der organischen Materie sehr verlangsamt scheint. Diese Böden können jedoch bei genügender mineralischer Düngung befriedigende Ernten erbringen.

РЕЗЮМЕ

Смежность расположения черноземов богатых органическим веществом и кислых буроземов на лейкократных гранитах в Районе Эймутье — Пейра-ле-Шато (Верхняя Вьена).

Ж. ДЭЖУ, Ж. ГЮИЙО, Ж. МОРИЗЕ.

Район Эймутье — Пэйра-ле-Шато (Верхняя Вьена), расположенный между долинами реки Вьены и ее притока Мольды, поблизости от плоскогорья Миллеваш, характеризуется гетерогенной смежностью своих почв, материнской породой которых, для всех, является основание из лейкократного гранита. Каковы-бы ни были топографическое расположение и растительный покров этих почв, здесь встречаются размещенные в беспорядке, но находящиеся в тесной ассоциации следующие группы :

а. Черные почвы — богатые органическим веществом (в среднем 10 % в 20-ти верхних сантиметрах), принадлежащие в большинстве к типу A (B) C, горизонт (B) которых характеризуется своей бурой окраской. Они составляют непрерывную серию, от кислых коричневых, до преобладающих бурых оподзоленных почв.

б. Кислые темно-коричневые почвы, главным образом типа AC, с содержанием органического вещества порядка 6 %.

в. Кислые коричневые почвы, с одинаковым профилем, но содержащие олиготрофный мулль, принадлежащие также к типу AC, но содержание органического вещества в которых, не превыщает в среднем 2,5-3 %. У некоторых из них имеется более или менее ярко выраженный горизонт (B) и они приближаются скорее к типам оподзоленных почв с тенденцией к бурой окраске.

Для черных почь встает очень сложный вопрос генезиса. Ведут-ли они свое происхождение от зон поднятых целин, восстановленных за счет леса или пустошей? Освоение их также очень сложно, так как минерализация органического вещества происходит в них как-будто замедленными темпами. Тем не менее, они могут давать удовлетворительные урожаи в случае внесения в них достаточных количеств удобрений.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BLANCHET R., STUDER R., CHAUMONT C., 1963. Appréciation détaillée du niveau phosphorique des sols par des techniques chimiques simples. *C. R. Acad. Agric., Fr.*, **49** (5), p. 348-356.

CHENEVOY M., 1958. Thèse : *Contribution à l'étude des schistes cristallins de la partie Nord-Ouest du Massif Central français*. 428 p. + 1 planche et 1 carte h. t. Paris, Imprimerie Nat.

DEJOU J., 1959. Thèse : Étude comparative des phénomènes d'altération sur granite porphyroïde de Lormes et sur anatexites à cordiérite du Morvan-Nord et les sols qui en dérivent. I. N. R .A. Paris, 164 p.

DEJOU J., GUYOT J., MORIZET J., 1966. Étude des sols reposant sur granites à 2 micas et micaschistes à biotite dans la région de Bessines-Laurière (Haute-Vienne). *Bull. Ass. fr. Et. Sol.*, nº 10, p. 288-315 + 32 p. en annexe.

DEJOU J., GUYOT J., MORIZET J., 1967. Présence de sols noirs, très riches en matières organiques sur les leucogranites de la région d'Eymoutiers-Peyrat-le-Château (Haute-Vienne). *C. R. Acad. Agric. Fr.*, **53** (3), p. 264-273.

DEJOU J., PEDRO G., 1967. Note sur l'évolution superficielle des granites : à propos de la formation des arènes dans les pays tempérés et de la présence de Kaolinite au sein de la zone d'altération. *Bull. Ass. fr. Et. Sol.*, nº 1, p. 9-12.

DUPUIS J., HOREMANS P., 1966. Observations sur quelques sols du Massif Central. *Ann. Inst. nation. agron.*, **4**, p. 317-375.

DUTHION C., CHRETIEN J., 1966. Évolution des caractères analytiques de quelques sols forestiers en cours de podzolisation dans les Basses-Vosges. *Sci. Sol*, nº 2, p. 15-28.

HENIN S., MONNIER G., COMBEAU A., 1958. Méthode pour l'étude de la stabilité structurale des sols. *Ann. agron.*, **9**, p. 73-92.

JOHANNSEN Ph., D. A., 1949. *A descriptive petrography of the igneous rocks*. The University of Chicago Press, Chicago (Illinois), 3e édition.

JUNG J., BROUSSE R., 1959. *Classification modale des roches éruptives, utilisant les données fournies par le compteur de points*. 1 vol. 122 p., Masson, Paris.

LAMEYRE J., 1966. Thèse : leucogranites et muscovitisation dans le Massif Central français. *Ann. Fac. Sci. Univ. Clermont-Ferrand, Géol. Min.*, 12e fasc., nº 29 (voir pages 176-215).

LAPADU-HARGUES P., 1964. Les Phyllosilicates dans les granites et leur signification. *Trav. Lab. Géol Min. Fac. Sci. Clermont-Ferrand, Série Doc.*, nº **7**, 17 p. + 5 tableaux.

MONNIER G., TURC L., JEANSON LUSINANG C., 1962. Une méthode de fractionnement densimétrique par centrifugation des matières organiques du sol. *Ann. agron.*, **13** (1), p. 55-63.

MONNIER G., 1965. Thèse : Action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols. *Ann. agron.*, 140 p.

RAGUIN E., 1957. *Géologie du Granite*. p. 250 et suivantes. Masson, Paris.

SAJOT M., 1960. Les sols de la région de Lormes. *Bull. Ass. fr. Et. Sol.*, nº **12**, p. 550-588.

SOIL SURVEY STAFF., 1960. *Soil classification. A comprehensive system. 7th approximation*. 1 vol., 265 p., 44 fig. Soil Survey Staff, Soil conservation service, US Depart of Agric., Washington.

Étude des sols sur leucogranites de la région

N° échantillon	Type de profil	Profondeur du prélèvement (en cm)	Profondeur du sol jusqu'à l'arène ou la roche (en cm)
11 12 13 14	Sol très noir et profond	0-20 30-35 35-45 50-80	Arène à 45 cm
1 *bis*-1 1 *bis*-2	Sol très noir	0-20 30-40	Arène à 60 cm
21 22 23	Sol noir	3-20 20-35 35-50	Arène à 35 cm
31 32	Sol noir	0-20 25-40	Arène sans cailloux à 20-25 cm
41 42 43 44 45	Sol très noir	0-10 10-20 30-60 80-140 Roche-mère	Arène ocre à 25 cm
51 52 53	Sol type brun acide	0-20 20-40 40-60	Arène fine à 100 cm
61 62 63	Type proche des bruns acides Interm. entre sols noirs et bruns	0-20 20-40 Roche-mère	Arène claire à 60-65 cm
71 72 73 74	Même type que 61 Sol brun foncé sur colluvions	0-20 20-35 40-60 60-80	Arène claire à 60 cm
81	Sol brun acide	0-20	Arène à 60 cm
91 92 93 94	Sol brun foncé	0-20 20-40 45-60 Roche-mère	Arène à 45 cm
101 102 103 104	Sol très noir	0-20 20-30 30-60 60-90	Arène claire à 60 cm

EXE I

d'Eymoutiers — Peyrat-le-Château (Haute-Vienne)

Localisation du prélèvement	Coordonnées Lambert II Carte I.G.N. 1/50 000e	Topographie	Cultures pratiquées
Les Plaines Saint-Amand-le-Petit	Saint-Léonard-de-Noblat XXI-31 554,7 × 85	Horizontale Fonds de vallon	Cultures variées : Pommes de terre, Betterave, Carotte, Topinambour, Rutabaga, Seigle, Orge
Les Plaines Saint-Amand-le-Petit	Saint-Léonard 554,7 × 84,9	Horizontale	Identiques au profil 11-14
Saint-Amand-le-Petit près de la côte 379	Saint-Léonard 556,5 × 85,4	Replat avant un sommet arrondi	Lande à Callune, Bruyère, Genêt
Saint-Amand-le-Petit	Saint-Léonard 555,5 × 85	Presque plat	Cultures variées
Route de Charapoux	Saint-Léonard 554,3 × 84,6	Zone plate	Prairie temporaire
Près de Lafaye	Saint-Léonard 553,6 × 85,7	Replat avant le fond de la vallée	Prairie naturelle
La Sauterie Cne Eymoutiers	Saint-Léonard 552,8 × 83,7	Flanc d'un mamelon	Cultures variées : Topinambour, Rutabaga, Betterave
La Sauterie Cne Eymoutiers	Saint-Léonard 552,8 × 83,6	Profil en bas de pente	Pomme de terre, Betterave, Luzerne
Près de la Vialle Cne Eymoutiers	Saint-Léonard 553,7 × 83,6	Sommet d'un mamelon	Topinambour, Céréales
Le Rabaseix Cne Eymoutiers	Saint-Léonard 553,9 × 84	Zone plate	Topinambour
Le Rabaseix	Saint-Léonard 554,5 × 84,5	Sommet d'un plateau	Cultures variées Betterave, Topinambour, Seigle

Étude des sols sur leucogranites de la région

N° échantillon	Type de profil	Profondeur du prélèvement (en cm)	Profondeur du sol jusqu'à l'arène ou la roche (en cm)
111 112 113 114	Sol très noir	3- 25 35- 25 35- 50 70- 80	Arène claire à 60 cm
121 122 123 124	Sol très noir	0- 25 35- 25 40- 60 70- 90	Arène à 60 cm
131 132 133 134	Sol brun acide	0- 60 70-100 110-140 Roche-mère	Arène à 110 cm (couleur claire)
181 182 183 184 185	Sol noir	0- 20 20- 30 30- 45 45- 70 90-120	Arène à 70 cm
191 192 193 194	Sol très noir	0- 25 25- 35 45- 60 Roche-mère	Arène claire à 100 cm
201 202 203	Sol brun acide sur colluvions	0- 30 30- 50 90-120	Arène à 90 cm
211 212 213	Sol brun acide tendance ocre podzolique	0- 20 20- 40 45- 60	Arène claire à 100 cm
231 232 233 234 235	Sol noir	0- 20 20- 30 40- 60 65- 80 100-120	Arène à 60 cm
241 242 243 244 245 246	Sol complexe Micropodzol sur sol à tendance ocre podzolique	0- 3 3- 8 10- 30 30- 40 50- 70 Roche-mère	Arène et blocs de granite à 80 cm

EXE I (*suite*)

d'Eymoutiers — Peyrat-le-Château (Haute-Vienne)

Localisation du prélèvement	Coordonnées Lambert II Carte I.G.N. 1/50 000e	Topographie	Cultures pratiquées
Le Rabaseix	Saint-Léonard 554,7 × 84,5	Sommet d'un plateau	Lande à Callune, Bruyère, Genêt
Le Rabaseix	Saint-Léonard 554,3 × 84,4	Légère pente	Cultures variées : Plantes sarclées, Céréales
Saint-Amand-le-Petit (près du cimetière)	Saint-Léonard 554,7 × 86,4	Zone plate	Prairie naturelle
Près de Augne	Saint-Léonard 551,4 × 86,7	Pente moyenne	Cultures variées : Plantes sarclées, Céréales
Près de Augne	Saint-Léonard 551 × 87,7	Zone plate	Cultures variées : Plantes sarclées, Blé, Seigle, Trèfle
La Reveillère	Saint-Léonard 556,5 × 85,5	Fond d'un vallon	Prairie naturelle (qualité médiocre)
Le Bordeleix	Saint-Léonard 557,7 × 85,8	Zone de plateau	Cultures variées : Plantes sarclées, Trèfle, Céréales
Près de la Subertange	Saint-Léonard 553,9 × 88,4	Très légère pente	Plantes sarclées et Céréales
Près de Serre	Saint-Léonard 552,9 × 86,9	Légère pente	Forêt : Sapin et quelques châtaigners

Ann. agron., 1968, **19** (5), 541-551.

INFLUENCE DES CONDITIONS DE SÉCHAGE DES TERRES SUR LEUR STABILITÉ STRUCTURALE

G. MONNIER et L. KONAN

Laboratoire des Sols, Station centrale d'Agronomie,
Centre national de Recherches agronomiques, 78 - Versailles
Institut national de la Recherche agronomique

SOMMAIRE

En faisant varier les conditions de séchage des échantillons prélevés, il est montré que celles-ci ont, dans le cas des terres contenant des matières organiques, une influence sensible sur la stabilité structurale. Ce phénomène est rapproché des observations, faites par ailleurs, reliant le comportement vis-à-vis de l'eau d'une terre à son « histoire hydrique » au cours de la période précédant le prélèvement.

INTRODUCTION

La plupart des méthodes couramment utilisées pour évaluer la stabilité structurale des terres s'appliquent à un échantillon, préalablement « séché à l'air », c'est-à-dire exposé jusqu'à poids constant à l'atmosphère d'un laboratoire ou d'un local spécialement affecté à cet usage. Au cours de ce traitement, la quantité d'eau perdue, le temps de séchage et l'humidité finale dépendent pour un matériau donné de son humidité au départ, de la température et du degré hygrométrique de l'air ambiant.

Notre but est d'examiner ici quelles peuvent être les répercussions de cet ensemble de conditions sur les résultats du test de stabilité structurale utilisé. Notons dès à présent qu'une telle recherche présente un double intérêt : tout d'abord, d'un point de vue technique, nous chercherons à préciser les précautions éventuelles à prendre lors du séchage — pour améliorer la reproductibilité et la fidélité de la méthode — tout en conservant sa validité générale. Mais l'on peut aussi penser qu'une telle étude aborde un problème de fond : celui des relations qui peuvent exister entre la stabilité structurale d'une terre et son « histoire hydrique » récente telles qu'elles ressortent d'un travail récent de M. SÉBILLOTTE (1968) sur l'évolution du sol sous différentes rotations de culture ou telles qu'elles sont suggérées par l'examen des variations saisonnières de stabilité structurale (G. MONNIER, 1965).

MÉTHODES D'ÉTUDES ET MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL

1. *Appréciation de la stabilité structurale*

Nous avons utilisé la méthode proposée par S. HENIN et G. MONNIER (1956) en suivant la technique standardisée décrite par A. FÉODOROFF (1960). Les résultats sont présentés non sous la forme globale de l'indice S, mais sous forme des taux d'agrégats stables obtenus à l'issue des différents tests de tamisage sous l'eau Ag_a p. 100 après prétraitement à l'alcool éthylique, Ag_b p. 100 après prétraitement au benzène et Ag_e p. 100 sans prétraitement.

Ces données partielles permettent en effet une interprétation particulière à chacune d'elle (G. MONNIER, 1965 ; D. KHEYRABI et G. MONNIER, 1968). C'est ainsi qu'un prétraitement à l'alcool éthylique permet de déceler de petites variations de stabilité liées à des modifications de la cohésion à l'état humide du matériau étudié, tandis que le résultat du test au benzène est principalement fonction de la mouillabilité de l'échantillon. Il devient alors possible de se faire une idée du mécanisme principal par lequel un traitement donné du sol modifie la stabilité de sa structure.

2. *Matériel expérimental*

Nous avons opéré sur deux sols situés dans le périmètre du Centre national de la Recherche agronomique à Versailles. Ces deux matériaux, qui présentent l'un et l'autre une stabilité structurale moyenne, se distinguent par les facteurs déterminant cette propriété.

Le premier constitue les 20 premiers centimètres d'un sol de limon appartenant au dispositif dit des « 42 parcelles » et qui a reçu depuis près de 40 ans des apports annuels de fumier de ferme de l'ordre de 100 t/ha. Sa stabilité est essentiellement liée à une teneur élevée en matières organiques.

Le deuxième a été prélevé à la surface de cases lysimétriques remplies depuis une dizaine d'années avec un matériau argilo-limoneux tiré de l'horizon d'accumulation (H.B.) d'un sol de limon de la même région. Depuis sa mise en place, le sol conservé dans la case lysimétrique choisie, n'a porté aucune culture et a été maintenu propre par désherbage manuel. Très pauvre en matière organique, il doit sa stabilité à une texture favorable.

Le tableau 1 rassemble les principales caractéristiques de constitution de ces deux terres.

TABLEAU 1

Caractéristiques des sols étudiés

Composition granulométrique p. 100	« 42 parcelles » Traitement fumier	Horizon B (cases lysimétriques)
Argile $> 2\ \mu$	17,70	28,50
Limon 2-20 μ	22,75	24,00
Limon 20-50 μ	35,00	44,30
Sable fin 50-200 μ	17,25	1,50
Sable grossier 0,2-2 mm	3,00	0,50
Matières organiques	4,35	0,70
Carbone p. 1 000	25,3	4,04
Azote p. 1 000	2,10	0,46
C/N	12,05	8,8
pH	7,30	6,40

RÉSULTATS ET DISCUSSION

1. *Expérience préliminaire*

Des échantillons prélevés avec les précautions habituelles dans la couche superficielle des sols en place ont été répartis chacun en 3 lots séchés en mottes respectivement dans les conditions suivantes :

1° à l'étuve à 105° jusqu'à poids constant ;

2° à l'air dans les conditions assez fluctuantes de l'atmosphère du laboratoire : température comprise entre 20 et 25° — humidité relative comprise entre 60 et 70 p. 100 de la saturation ;

3° dans une enceinte climatisée, dans des conditions thermiques (20°C) et hygrométriques (50 p. 100) constantes.

A l'issue de ces traitements, les échantillons ont été forcés à la main à travers un tamis de 2 mm d'ouverture de maille. Les tests de tamisage sous l'eau ont été pratiqués sur des agrégats de diamètre compris entre 200 et 2 000 μ extraits par tamisage à sec de la terre fine obtenue (et non sur la terre fine totale comme dans la méthode standard) de façon à accroître la précision et la sensibilité de la méthode.

Les résultats sont consignés dans le tableau 2.

TABLEAU 2

Influence du type de séchage sur la stabilité structurale

Mode de séchage	42 parcelles « fumier »			H. B. Cases lysimétriques		
	Ag_a p. 100	Ag_b p. 100	Ag_e p. 100	Ag_a p. 100	Ag_b p. 100	Ag_e p. 100
Air laboratoire	12,0 (100) (1)	7,8 (100)	6,1 (100)	18,8 (100)	1,7 (100)	4,1 (100)
Armoire climatique	13,1 (109)	6,8 (87)	6,0 (98)	17,8 (86)	1,8 (105)	5,2 (126)
Étuve à 105°	23,2 (193)	31,7 (406)	17,0 (275)	20,2 (107)	1,8 (105)	7,8 (190)

(1) Entre parenthèses — sous les différents taux d'agrégats — les valeurs indexées par rapport au mode de séchage usuel (air laboratoire).

On peut faire un certain nombre de constatations :

— les résultats obtenus après séchage à l'air classique permettent de préciser le comportement des deux échantillons étudiés : le limon, enrichi en matière organique présente normalement un taux Ag_b relativement élevé par rapport à son taux

d'agrégats stables après prétraitement à l'alcool : sa stabilité est liée bien davantage à une faible mouillabilité qu'à une cohésion à l'état humide élevée. Le limon argileux pauvre en matière organique présente un taux d'agrégats ($^1/_3$ Ag_a + Ag_e + Ag_b) très voisin (8,2 au lieu de 8,6) pour des raisons inverses (cohésion à l'état humide plus élevée, mouillabilité beaucoup plus forte). Les échantillons choisis représentent donc bien 2 types différents de comportement.

La régularisation des conditions de séchage obtenues dans l'enceinte climatique n'a d'influence sensible sur aucun test d'aucun des deux échantillons étudiés. L'erreur relative (P = 0,01) de ce type de détermination est en effet de l'ordre de ± 7 p. 100 ;

— Par contre, le séchage à l'étuve à 105° provoque un accroissement très important de la stabilité du limon organique, sans modifier le comportement du limon argileux. L'examen détaillé des résultats obtenus sur le premier permet de conclure sans ambiguïté que le séjour dans l'étuve à 105° a provoqué une diminution notable de mouillabilité et que c'est cette évolution qui est à l'origine de l'accroissement de stabilité : c'est en effet le taux Ag_b qui est le plus affecté (il est quadruplé par rapport au témoin séché à l'air) ; les variations de Ag_e et Ag_a dans l'ordre de moins en moins fortes en sont alors des conséquences obligatoires sans qu'il soit nécessaire pour les expliquer de faire intervenir une variation éventuelle de cohésion de terre humide. Le comportement inchangé du limon argileux confirme d'ailleurs cette manière de voir ;

— Quant à l'influence du mode de séchage qui se manifeste dans les taux Ag_e p. 100 du limon argileux, elle est difficilement interprétable. Les variations notées sont trop importantes pour être imputées à une erreur de mesure ; d'autre part, le fait que ni Ag_a ni Ag_b p. 100 ne soient affectés, interdit tout hypothèse classique.

En résumé, et si l'on excepte cette dernière particularité, il ressort clairement de cette première expérience, que le problème du mode de séchage se pose surtout pour les terres riches en matières organiques qui doivent leur stabilité à une faible mouillabilité. Aussi, un certain nombre des expériences suivantes destinées à préciser ces résultats préliminaires, porteront-elles uniquement sur le comportement du limon organique.

2. *Influence de l'humidité au moment du prélèvement*

Nous avons déjà noté qu'un traitement « séchage » devait être défini par l'humidité initiale de l'échantillon, c'est-à-dire dans le cas général par l'humidité du sol au moment du prélèvement.

Profitant d'une période estivale à pluies intermittentes, nous avons pu effectuer une série de prélèvements couvrant une gamme assez large d'humidité, et nous les avons soumis aux 3 types de séchage précédemment définis. Les tests de stabilité effectués ont porté uniquement sur le taux d'agrégats stables obtenus après prétraitement au benzène qui, dans l'expérience préliminaire, s'était avéré le plus sensible.

Les résultats sont regroupés dans le tableau 3.

Les conclusions apparaissent différentes suivant le mode de séchage.

— Dans le cas d'une dessiccation progressive, à la température ordinaire, la stabilité au benzène est d'autant plus élevée que les échantillons ont été prélevés à une humidité plus faible. Ces résultats sont en bon accord, — aussi bien en ce qui concerne le sens que l'ordre de grandeur des variations, — avec les observations effectuées sur les variations saisonnières de stabilité de la même parcelle (G. MONNIER, 1965).

Au cours de l'année, le taux Ag_b y passait de 6 p. 100 à la sortie de l'hiver à plus de 15 p. 100 en été. Ce qui est remarquable, c'est de retrouver à l'intérieur d'une période très courte le phénomène observé tout au long d'une année.

TABLEAU 3

Influence de l'humidité au prélèvement d'un limon organique sur son taux Ag_b p. 100

Humidité au prélèvement → / Type de séchage ↓	16,8	18,0	21,0	27,6	31,2	33,0
Air laboratoire (1)	12,1	12,9	9,3	8,5	7,8	7,8
Enceinte climatique (2) ..	10,0	—	8,0	8,4	6,2	6,5
Étuve à 105° (3)	35,5	43,8	28,0	14,2	31,7	31,6

Lorsque la dessiccation a lieu à l'étuve à 105°, l'influence de l'humidité au moment du prélèvement est encore manifeste mais les variations observées de stabilité sont anarchiques. Tout se passe comme si un séchage brutal était à même de révéler l'incidence complexe des variations d'humidité initiale, c'est-à-dire de l'humidité du sol au moment du prélèvement. Cette manière de voir se trouve confirmée si l'on simplifie la question posée en portant à l'étuve à 105° des fractions d'un prélèvement unique, effectué ici à une humidité voisine de la capacité au champ, qui ont été soumises au préalable à des « pré-séchages à l'air » plus ou moins poussés.

Le tableau 4 montre que si l'influence des conditions de séchage en essai est toujours nulle pour le limon argileux, elle se manifeste nettement et régulièrement cette fois en ce qui concerne le limon organique ; mais que, contrairement au cas d'un séchage progressif, la stabilité est d'autant plus élevée que l'humidité au moment de la mise à l'étuve était plus élevée.

TABLEAU 4

Influence de l'humidité de l'échantillon avant mise à l'étuve

Limon argileux (H. B.)	Humidité	2,1	2,5	5,5	19,5	24
	avant étuvage Stabilité (1)	100	101	101	101	98
Limon organique (42 p. fumier)	Humidité avant étuvage	2,0	10,0	26	30	—
	Stabilité (2)	100	145	209	288	—

(1) Valeur indexée sur le taux Ag_a obtenu pour l'humidité initiale la plus basse.
(2) Valeur indexée sur le taux Ag_b obtenu pour l'humidité initiale la plus basse.

Il est difficile de proposer une explication satisfaisante et suffisamment étayée a ces deux phénomènes d'allure opposée. On peut toutefois formuler quelques remarques :

1° *dans le cas d'un séchage dans les conditions ambiantes,* les résultats obtenus qui traduisent une hystérésis à l'humectation plus marquée pour des prélèvements effectués en terrain relativement sec (tabl. 3) peuvent être rapprochés des difficultés notées par S. PÉRIGAUD (1967) à propos de la réhumectation d'échantillons de terres très organiques ou tourbeuses en vue de la détermination de leurs caractéristiques hydriques *après qu'elles ont été séchées à l'air.* Cet auteur montre en effet que l'humidité mesurée à pF 2,7 croît alors avec la durée de réhumectation sans qu'un palier ait pu être atteint au bout de 16 jours : il apparaît également que cette humidité à pF 2,7 croît avec l'humidité initiale de l'échantillon au début de la réhumectation.

Par ailleurs, M. SÉBILLOTTE (1968) trouve que, pour un sol de limon battant dont le facteur essentiel de stabilité est la matière organique, et pour un précédent cultural donné, le taux d'agrégats au benzène et lui seul varie en sens inverse de la pluviométrie cumulée des deux mois précédant le prélèvement.

Rapprochées des observations déjà rappelées concernant les variations saisonnières des terres organiques et des résultats présentés plus haut, ces données suggèrent que l' « histoire hydrique » récente d'un échantillon y compris celle de la période au cours de laquelle il est encore en place, influe considérablement sur son comportement lorsque ce dernier dépend essentiellement des propriétés des matières organiques qu'il contient. Sans qu'on puisse préciser davantage pour l'instant, le mécanisme du phénomène ni ses conditions d'apparition, il apparaît qu'une telle terre sera d'autant moins facilement mouillable que son « histoire hydrique » sera à dominante plus sèche.

2° *Dans le cas d'un séchage à 105°* où l'humidité au moment de la mise à l'étuve a une influence opposée, on peut imaginer *a priori* que deux types d'action se superposent :

a) le premier serait un effet lié à la température : il interviendrait sur un échantillon déjà sec au moment de la mise à l'étuve ou après qu'il y ait perdu son humidité ;

TABLEAU 5

Influence sur la stabilité d'un échantillon de son maintien à l'étuve après dessiccation complète

(Humidité initiale : capacité au champ)

	Ag_a p. 100		Ag_b p. 100		Ag_e p. 100	
Durée de séjour	t. s. (1)	t. s. + 48 h	t. s.	t. s. + 48 h	t. s.	t. s. + 48 h
à l'étuve Limon organique 42 parcelles « fumier »	23,2	22,6	31,7	31,4	17,0	15,8
Limon argileux horizon B	22,2	20,3	1,8	1,8	7,8	7,3

(1) t. s. = durée de séjour à l'étuve juste nécessaire pour assurer la dessiccation.

les essais de chauffage d'échantillons enrichis en matières organiques et séchés à l'air auxquels nous avons procédé par ailleurs (G. MONNIER, 1965) indiquent que des effets de ce type lorsqu'ils se manifestent, n'apparaissent qu'à des températures plus élevées, supérieures à 105° ; d'autre part, le maintien d'un échantillon, organique ou non, à 105° après la fin du séchage, n'a aucune influence sur son comportement (tabl. 5) ;

b) le deuxième effet, qui reste une hypothèse plausible, serait lié à la circulation et à l'évaporation d'eau chaude au cours de la dessiccation à 105°. Nous avons remarqué que de nombreuses terres humifères, et en particulier le limon organique étudié ici, contiennent des quantités non négligeables de substances organiques solubles dans l'eau chaude.

On peut alors supposer qu'une dessiccation à 105° entraîne une redistribution de ces substances sur les surfaces d'évaporation provoquant ainsi une diminution de mouillabilité des agglomérats délimités par ces surfaces. S'il en est ainsi, on peut penser que le phénomène est d'autant plus marqué que la teneur en eau initiale est plus élevée et corollairement que le maintien à 105° d'un échantillon encore humide se trouve prolongé.

3° *Influence de la température de dessiccation*

Pour préciser l'influence de la température et de la vitesse de perte d'eau qui lui est liée, nous avons procédé au séchage de prises d'un échantillon de limon organique prélevé à une humidité de 33 p. 100, c'est-à-dire légèrement au-dessus de sa capacité au champ, à différentes températures comprises entre 0°C et 105°C.

La figure 1 représente les variations du taux Ag_b p. 100 en fonction de la température de séchage. Nous avons fait figurer sur la même figure, les variations de la vitesse initiale d'ascension capillaire mesurée par une technique décrite par ailleurs (G. MONNIER, 1965) qui constitue un moyen plus direct d'apprécier la mouillabilité des agglomérats soumis au test.

L'évolution similaire et, bien entendu, de sens opposé, de la vitesse d'ascension capillaire et du taux d'agrégats stables après prétraitement au benzène montre que si le phénomène responsable des observations faites au paragraphe précédent, est surtout marqué au-dessus de 80°C, il est sensible tout au long de l'échelle de 0 à 80°.

Il nous restait à chercher quelle pouvait être ici l'influence de l'humidité résiduelle variable, suivant les températures de séchage, de 0 à 5 p. 100 — une expérience complémentaire nous a montré que les deux terres étudiées, lorsqu'elles étaient, après avoir été préalablement séchées à 105°, amenées à des humidités comprises entre 0 et 5 p. 100 par séjour prolongé dans des atmosphères à humidité relative variables, ne voyaient pas leur comportement modifié si peu que ce soit.

Il est donc permis de conclure que c'est au cours même du séchage qu'intervient le phénomène responsable de la diminution de mouillabilité observée. Sans qu'on puisse préciser davantage, il apparaît de plus que la température et l'humidité présente y jouent un rôle essentiel.

CONCLUSIONS

Comme nous l'indiquons en introduction, nous attendions d'abord de ce travail des enseignements d'ordre technique. Sous réserve des considérations qui portent sur

la signification même des variations de comportement observées et que nous examinerons plus loin, on peut tirer de cette étude les quelques conclusions suivantes :

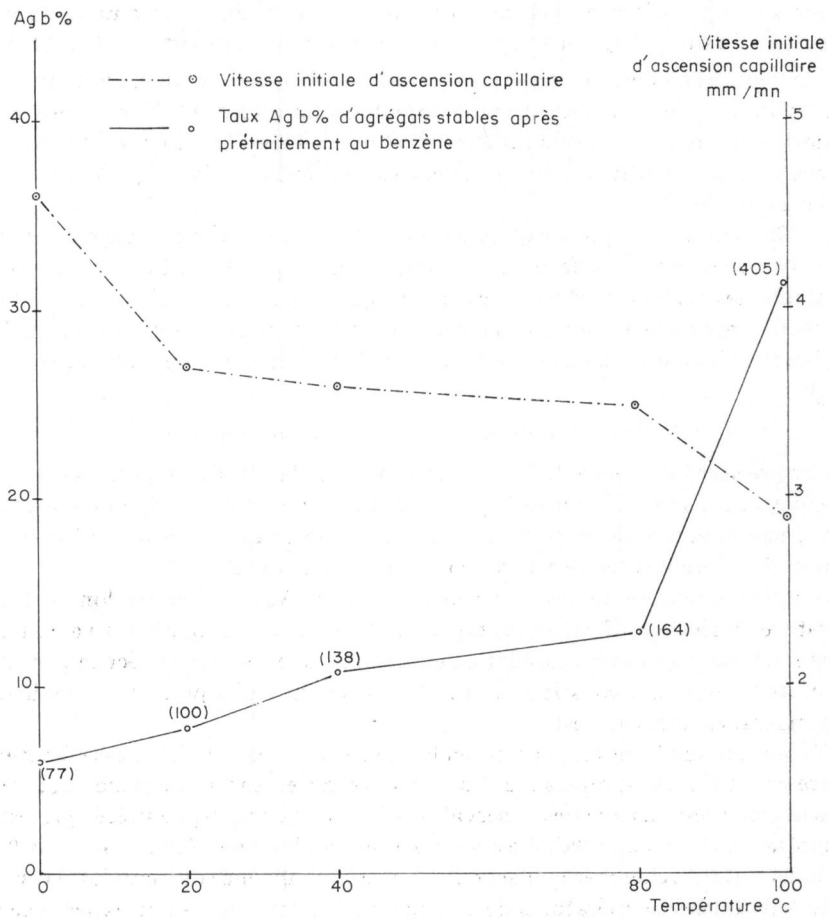


FIG. 1. — *Influence de la température de séchage sur la mouillabilité d'un limon humifère.*

— Il apparaît impossible de substituer au séchage classique à une température voisine de 20°C, un traitement à température sensiblement plus élevée. L'intérêt d'une telle manière de faire serait pourtant considérable ; d'une part, on diminuerait la gêne matérielle provoquée par une opération longue et encombrante ; d'autre part, on réduirait les risques de fermentations en cours de séchage susceptibles — pour certaines terres — de modifier les résultats obtenus.

Les inconvénients seraient pourtant beaucoup plus importants que les avantages. Ils tiendraient surtout au fait noté dès l'expérience préliminaire, et constamment confirmé par la suite, que les conditions de séchage n'affectent le comportement des terres que dans la mesure où il dépend essentiellement des matières organiques présentes. Un séchage à température élevée aurait alors pour conséquence d'introduire une discrimination systématique dans le classement général des terres au détri-

ment des matériaux de sous-sol ou de ceux qui constituent les couches arables et dont la stabilité résulte de caractéristiques texturales.

— Par ailleurs, un tel mode de séchage accentuerait d'une façon excessive et, dans l'état actuel de nos connaissances, peu prévisible, les variations liées à l'humidité du matériau au moment du prélèvement.

— Il faut noter aussi que le séchage rapide à 105° n'est pas le seul à présenter ces inconvénients. Les résultats obtenus à 40 et 80°C représentés dans la figure 1 nous permettent d'affirmer, qu'un séchage plus modéré, dans un tunnel à chauffage par lampes à infrarouge par exemple, peut introduire des perturbations importantes.

— Enfin, et ceci vient heureusement simplifier le problème, ni les fluctuations d'ambiance (température et degré hygrométrique) autour des conditions moyennes rencontrées dans les locaux de séchage, ni les variations d'humidité résiduelles, liées pour un matériau donné, à ces fluctuations, ne paraissent avoir de conséquences sensibles.

Une deuxième série de conclusions porte sur les relations générales existant entre la stabilité structurale d'un échantillon au champ à un moment donné d'une part, et son « histoire hydrique » antérieure d'autre part. Comme l'a souligné M. SÉBILLOTTE (1968), les agriculteurs savent bien que pour une parcelle et une situation culturale données, la dégradation de la structure au début de l'hiver est moins marquée lorsque la fin de l'été et l'automne ont été secs. On pouvait se demander si, lors d'une appréciation de la stabilité structurale au laboratoire qui ne peut, pour de multiples raisons, se concevoir que sur un échantillon préalablement débarrassé de la plus grande partie de son humidité, on ne risquait pas, de ce fait de « gommer » en quelque sorte les variations liées à l'influence de l'humidité de la terre au champ au cours de la période précédant le prélèvement.

Les résultats enregistrés ici, venant compléter à l'issue d'une démarche différente, ceux de M. SÉBILLOTTE et des différents auteurs qui ont étudié les variations saisonnières de stabilité structurale montrent qu'il n'en n'est rien. Le danger semble être qu'à l'inverse, certains types de séchage accentuent de façon excessive et surtout désordonnée, les fluctuations réelles de comportement.

Dans un autre ordre d'idée, il est remarquable de noter que l'ensemble des variations de stabilité observées au cours des différentes expériences rapportées ici et qui résultent toutes de traitements de très courte durée allant de quelques heures à quelques jours, soient analogues à celles qui ont été observées dans le milieu naturel à l'issue de variations de régime hydrique de beaucoup plus longue période. On peut alors penser que le mécanisme de ces fluctuations n'est pas pour l'essentiel lié à des variations d'activité des microorganismes. Il conviendrait mieux semble-t-il, de rechercher une solution dans la direction indiquée par Z. NEVO et J. HAGIN (1965) qui ont montré qu'en 3 mois, le maintien d'échantillons à l'état sec provoquait une modification importante de la structure physico-chimique des substances organiques dans le sens d'un accroissement de surface, et cela que le sol ait été ou non préalablement stérilisé.

Reçu pour publication en juin 1968.

SUMMARY

EFFECTS OF THE DRYING CONDITIONS OF SOILS ON THEIR STRUCTURAL STABILITY

The effects of the drying conditions of soils on their structural stability have been investigated on two soil samples : a silty soil high in organic matter and a silty clay.

It appears that the effects are positive only on the first soil type and they are related to the large variations of its wettability which depends not only on the drying temperature but also on the soil moisture at sampling time.

The results obtained lead to the following conclusions regarding the steps to be taken in the preparation of soil samples for the wet sieving test :

i) the samples must be dried at 20°C, or thereabouts. It is, however, not necessary to control this temperature or the relative humidity of the air with great accuracy.

ii) Drying at a higher temperature increases inordinately the stability of soils high in organic matter, and this effect is further enhanced if the soil moisture content was high at sampling time.

High temperature drying is to be excluded for the wet-sieving results ; these are opposed to those obtained from samples dried at moderate temperatures or to those observed when the samples are subjected to normal annual seasonal changes, both in the laboratory and in the fields, or to a period with a particular climatic condition before sampling.

From a more general standpoint, the foregoing results agree fairly well with what is known about the relations between soil wettability and its recent hydrological history.

ZUSAMMENFASSUNG

EINFLUSS DER TROCKNUNGSEIGENSCHAFTEN DER BÖDEN AUF DIE STABILITÄT IHRES GEFÜGES

Der Einfluss der Trocknungseigenschaften der Böden auf die Stabilität ihres Gefüges wurde an zwei Stichproben untersucht : einem an organischem Material reichen Lehm und einem tonhaltigen Lehm.

Es wurde festgestellt, dass nur das Verhalten der ersten Stichprobe beeinträchtigt wurde, und dies in Beziehung mit sehr bedeutenden Variationen des Anfeuchtungsvermögens des untersuchten Materials. Dasselbe hängt nicht nur von der Trocknungstemperatur, sondern auch von der Feuchtigkeit des Bodens im Augenblick der Probenahme ab.

Was die zu treffenden Vorsichtmassregeln bei der Vorbereitung der Stichproben für den Test des Unterwassersiebens anbetrifft, so erlauben die gesamten erhaltenen Ergebnisse die folgenden Schlussfolgerungen :

— Das Trocknen soll ungefähr bei 20°C durchgeführt werden, ohne dass eine genaue Kontrolle diese Temperatur, noch des hygrometrischen Grades der Luft erforderlich sei;

— Eine bei einer höheren Temperatur durchgeführte Trocknung ruft eine übermässige Zunahme der Stabilität eines an organischen Materialien reichen Bodens hervor, und dies um so mehr, als die Entnahme aus einem feuchteren Boden vollzogen wurde.

— Dieses Ergebnis führt um so eher zum Auschlub eines solches Trocknungsverfahren als es eine entgegengesetze Tendenz

1) zu der bei gemässigterem Trocknen beobachtem Neigung aufweist sowie,

2) zur Bodenentwicklung sowohl im Freiland wie auch im Labor im Laufe der Jahreszeiten oder in Abhängigkeit von den vor der Probenahme herrschenden besonderen Witterungsverhältnissen.

Unter einem allgemeineren Gesichtspunkt zeigen die hier erhaltenen Ergebnisse Uebereinstimmung mit den bisher bekannten Beziehungen zwischen dem Anfeuchtungsvermögen der Böden und ihres kürzlichen Bewässerungszustandes.

РЕЗЮМЕ

Влияние условий сушки почв на прочность их структуры.

Г. МОННЬЕ, Л. КОНАН.

Авторы изучали влияние сушки почв на прочность их структуры, на двух образцах : суглинок богатый органическим веществом и тяжелый суглинок.

Выяснилось, что сушка влияла на поведение только первого образца, в связи со значительной изменчивостью смачиваемости изучавшегося материала, которая, в свою очередь, зависела не только от температуры сушки, но также и от влажности почвы в момент взятия образца.

Полученные общие результаты приводят к следующим выводам в отношении предосторожностей, которые необходимо принимать во время подготовки образца на испытание просеивания под водой :

— Сушка должна происходить при приблизительной температуре в 20 °C, без необходимости точного контроля этой температуры и степени гигрометрии воздуха.

— Сушка при более повышенных температурах вызывает черезмерное упрочнение структуры почв богатых органическим веществом, тем более сильное, чем была большей влажность почвы в которой был взят образец. Этот результат приводит к тем более вероятному исключению таких методов сушки в которых сильна тенденция противуположная той, которая обоснованна на умеренной температуре сушки и на эволюции почвы наблюдающейся в полевых или лабораторных условиях в течении всех времен года, или в зависимости от климатических особенностей периода предшествовавшего взятию образца.

С точки зрения более общей, полученные в данном опыте результаты достаточно совпадают с тем, что нам известно, об отношениях существующих между смачиваемостью почв и их недавним гидрическим прошлым.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

FÉODOROFF A., 1960. Évaluation de la stabilité structurale d'un sol (indice S). Nouvelles normes d'emploi pour l'appareil à tamiser. *Ann. agron.* **11**, 651-659.

HÉNIN S., MONNIER G., 1956. Évaluation de la stabilité structurale du sol. *C. R. 6e Congr. internation. Sci. Sol. Vol. B*, 49-52, Paris.

KHEYRABI D., MONNIER G., 1968. Influence de la composition granulométrique des terres sur leur stabilité structurale. *Ann. agron.*, **19** (2) 129-152.

MONNIER G., 1965. Action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols. Thèse, Paris.

NEVO Z., HAGIN J., 1965. Changes occuring in soil samples during air dry storage. *Soil Sci.* 102-3, 157-160.

PÉRIGAUD S., 1967. Difficultés d'appréciation des caractéristiques hydriques des sols riches en matières organiques. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, 28 juin, 932-939.

SÉBILLOTTE M., 1968. Stabilité structurale et bilan hydrique du sol. Influence du climat et de la culture. *Ann. agron.*, **19** (4), 403-414.

Ann. agron., 1968, **19** (5), 553-567.

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DE L'ACTION DU CHROME SUR LA CROISSANCE DES VÉGÉTAUX

H. MOULINIER, Rose MAZOYER
avec la collaboration technique de Irène AGUIS

Station d'Agronomie et de Physiologie végétale,
Centre de Recherches agronomiques de Provence, 06 - Antibes
Institut national de la Recherche agronomique

SOMMAIRE

Les auteurs étudient l'action de Cr^{3+} sur la croissance des végétaux. Sous la forme d'oxyde, Cr^{3+} n'a pas d'action ; sous la forme de sulfate, on observe une toxicité pour les végétaux cultivés sur terre acide et pauvre en acide phosphorique.

INTRODUCTION

Le présent travail a été fait à la demande du Centre technique du Cuir, soucieux de limiter les risques d'une éventuelle toxicité lors de l'utilisation des déchets de tanneries comme engrais organiques. Ces produits, de composition variable, contiennent toujours des matières organiques azotées. Dans la mesure où ces matières organiques se minéralisent dans le sol, elles peuvent contribuer à l'alimentation azotée des plantes. Mais actuellement le tannage des cuirs se fait souvent à l'aide des sels de chrome et la présence de chrome dans ces déchets peut avoir des conséquences sur la végétation.

Sur le plan chimique, on sait que le chrome est un élément du groupe VI et qu'il est placé dans le même sous-groupe que le molybdène et le tungstène. Ce métal peut présenter toutes les valences de 0 à 6, donner des anions et des cations, et participer à la formation de très nombreux complexes. Dans ce travail, nous nous sommes limités à l'étude du chrome trivalent puisque, dans les déchets de tanneries, on considère généralement que le chrome est sous le forme d'oxyde hydraté ou de sulfate du Cr^{III}.

Sur le plan agronomique, la mise au point bibliographique de Ruth GROSMAN (1966) fait apparaître que l'action du chrome sur les végétaux dépend notamment

de l'état de valence. Les composés du chrome trivalent sont parmi les moins toxiques. De plus, la solubilité de ces composés a également une influence : le nitrate et le sulfate, qui sont relativement solubles, sont plus rapidement toxiques que l'oxyde ou le phosphate insolubles. Dans nos essais, nous avons utilisé l'oxyde et le sulfate.

Dans une première série d'essais, nous avons observé les phénomènes provoqués par l'incorporation de chrome au sol sur des cultures de blé et de tomates, conduites jusqu'à la récolte. Puis par des essais rapides, en prenant comme critère la croissance des racines, nous avons tenté de préciser l'influence de quelques facteurs sur ces phénomènes.

I. — ESSAIS DE CULTURE SUR TERRE ENRICHIE EN CHROME

La réaction du sol pouvant avoir une influence prépondérante sur l'assimilabilité et par suite la toxicité des éléments mineurs, nous avons jugé utile de conduire nos essais sur deux types de sol : un sol acide et un sol calcaire dont les compositions chimiques respectives sont données dans le tableau I.

TABLEAU I

Résultats d'analyse des terres A et C

	Terre A	Terre C
Analyse physique		
Argile pour cent	14,3	26,4
Limon pour cent	12,5	31,0
Sables fins pour cent	7,0	23,1
Sables moyens pour cent	21,2	4,5
Sables grossiers pour cent	42,2	10,7
Analyse chimique		
pH (eau)	5,5	8,3
pH (KCl N)	4,3	7,5
Calcaire total pour mille	0	516
Calcaire actif pour mille	0	74
Azote total pour mille	0,47	2,02
Aci. phos. assi. (méthode Truog) P_2O_5 pour mille	traces	0,02
Potassium échangeable K_2O pour mille	0,09	0,42
Calcium échangeable CaO pour mille	0,06	—
Magnésium échangeable MgO pour mille	0,15	—
Sels solubles pour mille	traces	traces

De même, deux composés de chrome de solubilités différentes ont été retenus : l'hydrate du sulfate de chrome et l'oxyde de chrome. Pour mettre en évidence un seuil éventuel de toxicité, nous avons travaillé à 8 niveaux de chrome.

Les essais comportent donc 32 traitements élémentaires, et trois répétitions par traitement, soit en tout 96 pots de culture. Les mêmes pots ont porté deux cultures successives :

une culture de blé du 17-1-67 au 8-5-67
une culture de tomates du 12-5-67 au 10-9-67

A. — *Essai Blé*

1. *Dispositif expérimental*

Les pots de culture utilisés sont en grès vernissé, drainés à leur base et d'une capacité de 12 litres. Les deux sols utilisés sont initialement enrichis en matière organique et en tourbe pour en améliorer la structure, dans les proportions de 7 kg de terre, 250 grammes de tourbe et 500 grammes de fumier, pour chacun des pots de culture. La fumure de fond phospho-potassique a été incorporée au mélange à raison de 8 grammes de phosphate bicalcique et 5 grammes de sulfate de potasse par pot, ce qui correspond à une fumure de 650 kg/ha de P_2O_5 et 500 kg/ha de K_2O.

Le blé, variété *Florence-Aurore*, a été semé en place, à raison de 30 grains par pot, grains au préalable désinfectés à l'eau oxygénée et prégermés. La plantation a été éclaircie une première fois 13 jours après le semis, et une deuxième fois 15 jours plus tard, de façon à ne laisser en place que 10 plants homogènes par pot, ce qui correspond à une densité moyenne de plantation de 200 plants/m². Des pesées hebdomadaires ont réglé les arrosages. Deux apports d'azote ont été faits en cours de culture sous la forme de 5 grammes de nitrate de calcium par pot. La récolte a eu lieu trois mois et demi après le semis.

2. *Résultats.*

Production.

Le nombre d'épis, le poids sec des grains, le poids sec des tiges et des feuilles récoltés par pot en fin de culture, sont groupés dans le tableau 2. Chacun des chiffres donnés représente la moyenne des trois répétitions.

Il n'apparaît, entre les traitements, aucune différence significative de rendement quelles que soient la nature du sol, la forme et la concentration du chrome introduit dans le milieu.

Composition minérale.

Les déterminations de l'azote, de l'acide phosphorique, du potassium, du calcium et du magnésium ont été effectuées sur le matériel végétal séché à l'infrarouge. Là encore, il n'apparaît aucune variation dans les teneurs du matériel végétal dans les différents éléments dosés : la présence de chrome en quantité croissante ne modifie pas la composition des tissus.

B. — *Essai Tomates*

1. *Dispositif expérimental.*

Il est identique à celui de l'essai précédent. A la récolte du blé, les racines ont été éliminées au maximum et le mélange terreux conservé pour le présent essai. Cependant, les analyses du blé ayant fait apparaître une carence relative en acide phosphorique dans les tiges et les feuilles de blé, en sol calcaire, et une plus faible carence en potassium des plants développés en sol acide, il a été prévu un réajustement de la fertilisation : un apport de 8 grammes de phosphate bicalcique a été incorporé à chacun des pots renfermant le sol calcaire, les pots de sol acide recevant chacun 5 grammes de sulfate de potasse. Par ailleurs, une nouvelle addition de chrome identique à l'apport initial a été effectué avant la plantation.

Des plants de tomates, variété *John Moran*, âgés de 5 semaines, ont été mis en place à raison de trois plants par pot. Douze jours plus tard, un seul plant a été conservé de façon à avoir sur l'ensemble de l'essai une plantation homogène. Les plants ont été conduits sur deux bouquets floraux.

L'irrigation a été contrôlée par pesée hebdomadaire des pots ; la fertilisation azotée a éte assurée par deux apports de 5 grammes de nitrate de calcium par pot.

Les fruits ont été récoltés au fur et à mesure de leur maturité.

2. *Résultats.*

Production.

Les observations ont porté sur le rendement total en fruits et sur la production de tiges et de feuilles en fin de culture.

TABLEAU 2

Récolte pour un pot (blé)
(Moyenne des trois répétitions)

	Ce (mg/kg de terre)	Nombre d'épis		Poids sec de grains (en g)		Poids sec de tiges et feuilles (en g)	
		Terre C	Terre A	Terre C	Terre A	Terre C	Terre A
Sulfate de chrome	0	20,0	19,0	28,7	27,7	30,9	31,2
	10	19,0	23,7	26,3	28,5	32,0	34,2
	20	22,7	21,7	30,3	28,9	33,6	32,3
	50	21,7	20,7	31,2	29,4	35,2	33,5
	100	19,7	21,0	25,2	29,7	30,4	32,3
	200	21,3	17,7	28,8	27,7	31,3	30,0
	300	20,3	19,0	31,6	30,1	33,6	32,1
	500	21,3	20,4	31,1	30,4	33,3	30,6
Oxyde de chrome	0	20,3	20,0	26,8	33,0	31,5	32,6
	10	20,3	22,0	30,1	27,9	33,9	32,3
	20	20,3	21,3	30,3	28,6	33,8	32,7
	50	23,7	20,7	29,7	35,2	35,2	30,4
	100	17,3	19,0	24,8	28,7	28,7	31,9
	200	23,0	22,0	30,5	26,5	33,8	33,0
	300	21,3	21,7	30,4	26,3	33,1	31,9
	500	24,0	20,3	29,7	28,7	30,8	31,8

TABLEAU 3

Récolte pour un pot (tomates)
(Moyenne des trois répétitions)

	Cr (mg/kg de terre)	Fruits (poids frais en g)		Tiges (poids sec en g)		Feuilles (poids sec en g)	
		Terre C	Terre A	Terre C	Terre A	Terre C	Terre A
Sulfate de chrome	0	897	894	17,6	18,8	37,2	27,3
	20	825	811	21,0	18,3	39,6	27,6
	40	796	706	20,3	27,2	37,7	33,2
	100	754	757	25,4	26,1	40,7	35,8
	200	991	742	23,6	24,7	42,0	33,4
	400	774	753	18,6	22,0	36,5	30,8
	600	808	601	21,0	21,9	37,0	28,5
	1 000	809	597	24,0	16,4	36,6	21,3
Oxyde de chrome	0	882	627	21,9	19,4	41,4	28,0
	20	756	919	16,3	19,0	38,4	27,5
	40	848	820	20,7	21,6	38,9	30,3
	100	689	823	19,7	19,0	38,6	25,2
	200	868	840	18,5	23,1	37,9	31,9
	400	751	770	17,5	23,6	34,0	32,3
	600	990	772	17,4	20,8	33,6	32,3
	1 000	881	787	17,8	21,1	37,6	28,1

Les résultats sont groupés dans le tableau 3, dans lequel chaque chiffre représente la moyenne des trois répétitions.

On n'observe, dans ce cas encore, aucune action du chrome, sous forme de sulfate ou d'oxyde, en terre calcaire. Par contre, si l'oxyde de chrome reste sans action significative en terre acide, il n'en est pas de même pour le sulfate : l'analyse statistique des résultats montre que les variations du poids de matière sèche de feuilles récoltées en terre acide additionnée de sulfate de chrome sont significatives. Le poids sec des feuilles croît jusqu'à la dose 100 mg Cr/kg terre, puis décroît pour être minimum à la dose de 1 000 mg Cr/kg terre. Par ailleurs, les techniques de calcul de la covariation mettent en évidence une régression linéaire dans cette même série (terre A + sulfate de chrome) entre la quantité de chrome introduite et le rendement en fruits frais : le coefficient de corrélation r entre ces deux valeurs est de — 0,523 9, ce qui correspond à une probabilité égale à 0,02. En terre acide, le sulfate de chrome diminue le rendement en fruits frais : dès les doses de 100 et 200 mg Cr/kg terre, le rendement est inférieur au témoin d'une manière significative, et le traitement à 1 000 mg Cr/kg terre réduit le rendement à 70 p. 100 du rendement témoin.

Composition minérale.

L'analyse chimique a été effectuée séparément sur les fruits, les feuilles et les tiges. Nous avons déterminé les teneurs en acide phosphorique, potassium, calcium et magnésium sur les différents organes ; la teneur en azote n'a été déterminée que sur les feuilles.

L'addition de chrome n'a pas d'action sensible sur la composition minérale des tomates cultivées en sol calcaire ; les différences observées ne sont pas significatives.

En terre acide, on retrouve, comme pour les rendements, l'action du sulfate de chrome (tabl. 4), qui se manifeste par une diminution des teneurs en calcium et en phosphore du végétal : les coefficients de corrélation entre ces résultats d'analyse et les doses de chrome apportées à la terre sont :

pour P_2O_5 des fruits $r = -0{,}725$
pour Ca des fruits $r = -0{,}204$
pour P_2O_5 des tiges $r = -0{,}711$
pour Ca des tiges $r = -0{,}420$
pour P_2O_5 des feuilles $r = -0{,}773$
pour Ca des feuilles $r = -0{,}535$

Tenant compte de ces résultats, nous avons analysé, après la récolte, les terres de la série terre acide additionnée de sulfate de chrome. Les seules différences entre le traitement à 1 000 mg Cr/kg et le traitement témoin portent sur le pH et l'acide phosphorique assimilable ; la teneur en calcium échangeable notamment ne varie pratiquement pas avec les diverses doses de chrome.

L'acide phosphorique extrait par la méthode de Truog a été dosé sur l'ensemble des terres après la récolte. Ces résultats sont donnés dans le tableau 5.

On constate qu'en terre acide, les doses croissantes de sulfate de chrome sont en corrélation inverse avec les teneurs en acide phosphorique assimilable. Entre ces deux facteurs, le coefficient de corrélation est très élevé, $r = -0{,}925$. Pour la terre calcaire ce phénomène est beaucoup moins marqué : la diminution de la teneur en acide phosphorique assimilable ne se manifeste que pour les doses de Cr égales ou supé-

TABLEAU 4

Analyse minérale des tomates cultivées en terre acide avec sulfate de chrome
(les résultats sont exprimés en p. 100 de matière sèche)
Moyenne des trois répétitions

Matériel analysé	Cr (mg/kg terre)	N	P_2O_5	K	Ca	Mg
Fruits	0		1,17	4,89	0,32	0,11
	20		1,20	4,74	0,32	0,10
	40		1,24	4,84	0,32	0,12
	100		1,22	4,62	0,30	0,12
	200		1,17	4,85	0,31	0,12
	400		1,10	4,39	0,32	0,12
	600		1,09	4,59	0,29	0,14
	1 000		0,97	4,58	0,29	0,12
Tiges	0		0,95	1,96	1,78	1,14
	20		1,11	2,63	1,90	1,24
	40		0,82	2,09	1,53	0,99
	100		0,79	1,78	1,19	0,78
	200		0,73	2,02	1,32	0,90
	400		0,63	2,01	1,24	0,83
	600		0,59	2,07	1,33	0,95
	1 000		0,48	1,89	1,23	0,96
Feuilles	0	1,23	1,20	2,73	6,31	0,90
	20	1,51	1,44	3,58	6,46	0,90
	40	1,19	1,14	3,18	5,51	0,76
	100	1,24	0,97	2,30	5,38	0,74
	200	1,27	0,87	2,81	5,38	0,74
	400	1,30	0,75	2,41	5,41	0,76
	600	1,36	0,68	2,78	5,00	0,88
	1 000	1,43	0,42	2,67	4,88	1,05

TABLEAU 5

Acide phosphorique assimilable (méthode de TRUOG)
Exprimé en g P_2O_5 par kg de terre
Moyenne des trois répétitions

Cr (mg/kg terre)	Sulfate de chrome		Oxyde de chrome	
	Terre C	Terre A	Terre C	Terre A
0	0,29	0,27	0,37	0,28
20	0,33	0,23	0,35	0,26
40	0,33	0,24	0,38	0,27
100	0,32	0,20	0,36	0,24
200	0,33	0,14	0,30	0,24
400	0,24	0,11	0,34	0,22
600	0,19	0,09	0,33	0,27
1 000	0,19	0,04	0,32	0,30

rieures à 200 mg Cr/kg terre. Il convient de noter par ailleurs qu'il existe une corrélation positive très forte ($r = 0{,}932$) entre la teneur en acide phosphorique assimilable de la terre acide et la teneur en P_2O_5 des feuilles de tomates.

Enfin, il nous a été possible de faire déterminer par spectrographie d'arc les teneurs en chrome des feuilles de tomates de la terre acide enrichie en sulfate de chrome. Les résultats en sont donnés dans le tableau 6 :

TABLEAU 6

Teneur en chrome des feuilles de tomates cultivées sur terre acide additionnée de sulfate de chrome

(Résultats exprimés en mg Cr pour un kg de matière sèche)

mg Cr par kg de terre	
0	traces
20	0,70
40	0,78
100	1,0
200	1,1
400	1,8
600	3,5
1 000	3,8

C. — *Discussion des résultats*

En comparant les résultats des deux cultures successives, on note d'abord que seules les tomates ont eu une végétation réduite par les apports de chrome alors que les blés se sont développés normalement dans tous les cas. On ne peut cependant pas en conclure que la Tomate soit plus sensible que le Blé à la présence de chrome, car les doses de chrome essayées dans les deux cas sont différentes. Avant la deuxième culture, nous avons renouvelé l'apport de sulfate ou d'oxyde de chrome, c'est-à-dire que les tomates ont reçu une double dose de chrome. Dans ces conditions, on observe simplement que pour le blé, la dose maximum de chrome de 500 mg Cr/kg terre n'a pas été toxique et que, pour la tomate, la dose de 2 fois 100 mg Cr/kg terre a diminué le rendement.

La constatation essentielle que l'on peut faire d'après les résultats de cette première série d'expériences est que l'action du chrome sur la végétation peut être défavorable dans certaines conditions. Deux facteurs principaux déterminent cette action.

1. *La nature du composé chromique.*

L'oxyde de chrome n'a pas eu d'action défavorable sur la végétation alors que le sulfate peut diminuer le rendement des tomates et modifier la composition du sol et de la plante en divers éléments. Ceci confirme l'opinion de GERICKE (1943) qui avait noté une relation entre la toxicité et la solubilité des composés du chrome Cr^{III}. En effet, l'oxyde de chrome est insoluble alors que le sulfate hydraté est soluble.

2. *La nature du sol.*

Elle apparaît prépondérante : ce n'est qu'en sol acide que les doses les plus élevées de chrome ont provoqué une diminution de rendement. En sol calcaire, le chrome n'a jamais été toxique. Ceci peut s'expliquer, soit par la réaction alcaline du milieu, soit par la présence de calcaire, l'un et l'autre de ces facteurs pouvant entraîner une insolubilisation rapide du chrome sous une forme inassimilable par la plante.

Par ailleurs, dans les cas de toxicité, la diminution de teneur en acide phosphorique des plants de tomates, qui reflète la diminution de la teneur en acide phosphorique assimilable du sol enrichi en chrome, pose le problème d'une carence phosphorique qui pourrait être induite par une trop grande teneur du sol en chrome.

II. — INFLUENCE DU CHROME SUR LE DÉVELOPPEMENT RACINAIRE

Les phénomènes de toxicité mis en évidence dans les conditions expérimentales précédentes ne se traduisent apparemment que par des diminutions de rendements, sans symptômes visibles sur l'ensemble des parties aériennes du végétal. Toutefois, le mélange terreux utilisé ne permettant pas une extraction quantitative complète du système racinaire, nous n'avons pu compléter nos observations par l'examen des organes souterrains. Or, SOANE et SAUNDER (1959) précisent que la présence du chrome dans le milieu perturbe en premier lieu la croissance des racines, sans que la teneur en chrome des tissus ne s'élève considérablement. Les diminutions de rendement pourraient être le résultat d'une inhibition du développement racinaire. Il nous a paru indispensable de compléter les expériences précédentes par une étude du développement des racines dans des conditions du milieu sensiblement identiques à celles de nos précédents essais, en faisant appel à une technique mieux adaptée à l'objectif envisagé.

A. — *Technique*

Pour ces essais, nous avons utilisé la technique de culture de Stanford (1957). Cette technique a été adaptée à l'étude des racines. Nous utilisons des pots en matière plastique, de section circulaire et légèrement coniques. De tels pots sans fond sont remplis de sable et reçoivent 30 grains de blé prégermés. Après 10 jours, les racines sont suffisamment développées pour que l'on puisse disposer ce pot dans un pot semblable avec fond, contenant 200 g de la terre à essayer. Entre la terre et le sable on a placé une grille en nylon. Les racines se développent dans la terre et alimentent les plantes à partir des éléments minéraux contenus dans la terre. Après 5 jours de contact terre-racines, la galette de terre est extraite du pot et les racines développées sous la grille en nylon sont lavées par un courant d'eau sur un tamis à mailles de 2 mm, et pesées.

B. — *Protocole expérimental*

Nous avons, dans cet essai, utilisé une terre de réaction acide et une terre de réaction alcaline. Les doses de chrome apportées dans la couche inférieure de sol sont de 0, 50, 100, 200, 300, 400 ou 500 mg Cr par kilogramme de terre, soit sous forme d'oxyde, soit sous forme de sulfate. Chaque traitement comporte trois répétitions. Sur chaque pot, nous avons déterminé les poids frais et les poids secs des racines développées dans la terre après cinq jours de contact.

C. — *Résultats*

Ces résultats sont exprimés en p. 100 du témoin sans chrome pour la terre considérée ; ils sont donnés dans le tableau 7.

Quelle que soit la terre, l'oxyde de chrome n'a qu'une action faible sur la croissance des racines. Le sulfate de chrome, dans la terre de réaction alcaline, diminue un peu la production de racines. Mais le résultat le plus net est l'effet dépressif du sulfate de chrome en terre de réaction acide : pour 200 mg Cr/kg terre, la croissance des racines a diminué de moitié par rapport au témoin sans chrome et, à 500 mg Cr/kg, il n'y a pratiquement plus de racines.

TABLEAU 7

Matière fraîche des racines de blé
(p. 100 du témoin, technique de Stanford)

Cr (mg/kg terre)	Sulfate de chrome		Oxyde de chrome	
	Terre de réaction alcaline	Terre de réaction acide	Terre de réaction alcaline	Terre de réaction acide
0	100	100	100	100
50	102	96	100	91
100	107	35	93	80
200	90	81	107	91
300	78	48	121	99
400	72	33	110	90
500	76	3	124	87

D. — *Discussion*

Ces résultats confirment ceux obtenus dans les essais en pots sur tomates, à savoir :

— la toxicité plus grande du sulfate que de l'oxyde ;

— l'action dépressive du chrome en terre acide, et l'absence de toxicité en sol calcaire.

Ils confirment, par ailleurs, l'action marquée du chrome au niveau des racines, qui peut provoquer une diminution de rendement des parties aériennes. De plus, la similitude des résultats enregistrée dans les deux types d'essais, essais en pots de grès sur plante adulte et essais de courte durée en pots Stanford sur la croissance racinaire, nous a incités à utiliser cette dernière technique, plus rapide, pour étudier le rôle respectif du calcaire et de l'acide phosphorique dans la toxicité chromique.

III. — INFLUENCE DE LA RÉACTION DU SOL SUR LA TOXICITÉ DU CHROME

La technique utilisée est la technique Stanford modifiée, précédemment décrite.

A. — *Protocole expérimental*

Nous n'avons, dans cet essai, travaillé qu'avec la terre acide. Le chrome est introduit dans la couche de sol, sous la forme de sulfate et à la dose qui s'est avérée être nettement toxique : 300 mg de Cr/kg terre. La réaction du sol a été modifiée par incorporation de doses variables de carbonate de calcium : 0, 250, 500, 1 000 et 2 000 mg de carbonate de calcium par kilogramme de sol. Le témoin est constitué par la terre acide, sans apport de chrome ni de calcaire.

Chaque traitement comporte cinq répétitions.

B. — *Résultats*

Après 5 jours de culture, les racines développées dans la couche de sol sont prélevées et pesées après lavage à l'eau. Les poids de racines formées ainsi que les caractéristiques des échantillons de sol correspondants sont donnés dans le tableau 8 (moyennes des cinq répétitions).

TABLEAU 8

Essai avec addition de carbonate de calcium (technique de Stanford)

Traitement	Chrome incorporé au sol en mg/kg terre	CO_3Ca incorporé au sol en mg/kg terre	Poids frais des racines en mg/pot	Analyse de la terre en fin d'expérience	
				pH	Cr extractible en mg/kg terre
Témoin	0	0	1 079	5,4	traces
1	300	0	442	4,7	77
2	300	250	947	4,8	47
3	300	500	1 225	5,0	37
4	300	1 000	1 316	5,4	16
5	300	2 000	1 278	6,4	1

En fin de culture, le chrome de la terre est extrait par agitation avec une solution normale de sulfate de potassium.

L'analyse statistique des résultats met en évidence que les traitements : témoin, 2 et 3 ne sont pas significativement différents entre eux. Par contre, les productions de racines dans le traitement sans chrome et dans les traitements avec addition de calcaire sont supérieures de façon hautement significative à la production de racines dans la terre enrichie en chrome, mais ne recevant pas de calcaire. Les traitements 4 et 5, avec chrome et doses élevées de calcaire, donnent des productions de racines supérieures à la terre témoin acide.

L'incorporation de calcaire au sol supprime l'effet dépressif du chrome sur l'enracinement. On retrouve par ailleurs, aux fortes doses, l'action stimulante du calcaire sur le développement racinaire.

Dans le sol, l'addition de calcaire augmente sensiblement le pH et diminue considérablement le chrome extractible.

IV. — INFLUENCE DU PHOSPHORE SUR LA TOXICITÉ DU CHROME

La technique utilisée est la même que précédemment.

A. — *Protocole expérimental*

La même terre acide, enrichie en sulfate de chrome à la dose de 300 mg de Cr/kg terre, a reçu des quantités croissantes de phosphate monocalcique de 0, 630, 1 260 et 2 520 mg de phosphate monocalcique par kilogramme de terre. Le témoin est constitué, dans ce cas encore, par la seule terre acide ne recevant aucun complément de chrome ni de phosphate.

Chaque traitement comporte cinq répétitions.

B. — *Résultats*

Ils sont donnés dans le tableau 9 ; chaque résultat représente la moyenne des 5 répétitions.

TABLEAU 9

Essai avec addition de phosphate monocalcique
(technique de Stanford)

Traitement	Chrome incorporé au sol en mg/kg terre	Phosphate monocalcique incorporé au sol en mg/kg terre	Poids frais des racines en mg/pot	Analyse de la terre en fin d'expérience	
				pH	Cr extractible en mg/kg terre
Témoin	0	0	1 079	5,4	traces
1	300	0	442	4,7	77
2	300	630	958	4,6	39
3	300	1 260	1 098	4,4	34
4	300	2 520	797	4,4	13

L'analyse statistique des résultats met en évidence que :

— les traitements 2 et 3 ne sont pas différents du témoin,

— les traitements 2, 3 et 4 ne donnent pas de rendements différents les uns des autres,

— le traitement 1 est plus faible que tous les autres.

L'incorporation au sol de phosphate monocalcique neutralise l'effet dépressif du chrome. Le pH du sol est légèrement diminué, mais on remarque essentiellement que les quantités de chrome extractible diminuent quand la dose de phosphate augmente.

V. — DISCUSSION GÉNÉRALE

Aucun de nos essais avec le chrome sous forme d'oxyde n'a révélé la toxicité de ce métal. Par contre, le sulfate de chrome dans certains cas a diminué le rendement ou limité la croissance des racines. Ceci confirme l'opinion de GERICKE (*loc. cit.*) selon laquelle la toxicité des sels de Cr^{III} dépend de leur solubilité.

Mais en ce qui concerne l'action du sulfate de chrome, sel soluble, il apparaît nécessaire de tenir compte de plusieurs autres facteurs.

Dans l'essai ayant duré plusieurs mois avec cultures de blé et de tomates, l'action du sulfate de chrome a été nulle en terre calcaire. Dans l'essai rapide avec la technique de Stanford, la croissance des racines a été presque normale en terre de réaction alcaline, même pour des doses élevées de chrome. Enfin, dans le dernier essai du type Stanford, la toxicité due à 300 mg Cr/kg en terre acide a été supprimée par l'addition de carbonate de calcium. Donc le sulfate de chrome n'a pas d'action toxique lorsqu'il est incorporé à une terre calcaire ou à une terre acide suffisamment amendée avec du calcaire. D'autre part, l'acide phosphorique présent dans le milieu peut réagir sur le chrome. VERGNANO (1959) avait observé une relation inverse entre les teneurs en P et Cr de plantes spontanées ou cultivées sur des sols de serpentine. De même, SOANE et SAUNDER (1959) notaient une interaction possible entre le chrome et le phosphore dans le système sol-plante.

Dans nos cultures de blé et de tomates, l'analyse du matériel a montré que ces dernières plantes étaient pauvres en phosphore pour les fortes doses de chrome en terre acide. Les apports d'acide phosphorique en fumure de fond étaient cependant largement suffisants, à savoir environ 0,5 g P_2O_5 par kilogramme de terre. De plus, la forte dose de fumier a encore introduit une quantité appréciable de phosphore dans le milieu. L'analyse du sol des traitements sans chrome montre une grande richesse en acide phosphorique assimilable alors que pour les doses élevées de chrome en terre acide, la teneur en acide phosphorique assimilable est très faible. La carence relative des plants en phosphore se confirme donc par l'analyse du sol. S'il y a une réaction entre chrome et acide phosphorique, celle-ci se produit d'abord dans le sol.

L'essai du type Stanford avec phosphate monocalcique est également très intéressant à cet égard. L'effet toxique dû à 300 mg de chrome sous forme de sulfate est annulé par 630 mg de phosphate monocalcique. Or, si l'on admet qu'il se soit produit une réaction de double décomposition entre ces deux sels pour aboutir à la précipitation de phosphate de chrome, Cr PO_4, on constate que 300 mg de chrome sous forme de sulfate réagissent effectivement avec 726 mg de $CaH_4(PO_4)_2$, H_2O. Tout s'est donc passé comme si presque tout le chrome avait été insolubilisé à l'état de phosphate. Cette absence de toxicité du phosphate de chrome a été signalée par GERICKE (*loc. cit.*) lors d'une étude sur les scories et doit être due à la très faible solubilité de ce sel.

Cette interaction entre chrome et phosphate explique les différences observées entre les résultats obtenus dans les cultures de longue durée pour les tomates et ceux

obtenus pour les racines dans les essais type Stanford. Dans les premiers, la dose toxique peut être située aux environs de 1 000 mg Cr/kg terre, alors que dans les seconds, elle est de 200 à 300 mg Cr/mg terre. Les cultures de tomates avaient reçu en fumure de fond du phosphate monocalcique alors que les essais Stanford ont été réalisés sur une terre sans fumure de fond.

Pour cette même raison, le phosphore ainsi précipité n'est plus à la disposition des plantes, ce qui explique la carence relative en P, observée dans les tomates. S'il y a un excès de phosphore par rapport au chrome, ce métal n'est pas toxique et l'alimentation phosphatée des plantes est bonne. Par contre, si le chrome est en excès, sa toxicité se manifeste et de plus, les plantes sont carencées en phosphore. Dans ce cas, la mauvaise végétation peut être attribuée soit à l'action directe du chrome (toxicité) soit à l'action indirecte due à l'insolubilisation du phosphore par le chrome(carence en phosphore).

Ces constatations doivent être rapprochées de celles que l'on fait à propos de l'aluminium. Dans l'ouvrage de E. BEAR (1964), MACK DRAKE dit notamment, à propos des sols acides : « Bien que certains chercheurs parlent de toxicité de l'aluminium, les problèmes avec l'aluminium actif qui peuvent être résolus par un apport suffisant d'engrais phosphatés, sont plus logiquement qualifiés de déficience en phosphore. » De plus, cet auteur poursuit : « S'il existe de l'aluminium actif dans les cellules de la plante ou dans ses tissus conducteurs, l'activité des phosphates doit être réduite et la croissance ou la qualité de la plante sera limitée suivant le degré de la déficience en phosphore. »

CONCLUSION

L'étude de la toxicité du chrome a été abordée en vue de l'utilisation éventuelle des déchets de tanneries comme engrais. Ces déchets contiennent en effet des matières organiques azotées provenant du cuir. Cependant, leur teneur en chrome peut faire craindre l'apparition de conditions défavorables pour la végétation.

Suivant leur nature, les composés de chrome trivalent ont des actions différentes sur la végétation. L'oxyde, étant insoluble, n'a jamais provoqué de toxicité dans nos essais. Par contre, dans des conditions déterminées, le sulfate peut limiter la croissance des racines et des parties aériennes ainsi que le rendement. La nature du composé chromique intervient donc dans la mesure où elle détermine sa solubilité. Dans les déchets de tanneries, le chrome sera d'autant moins toxique qu'il sera sous forme insoluble.

Par ailleurs, les conditions de sol ont également une grande importance. En sol calcaire, nous n'avons pas observé de réduction dans la croissance des plantes ; on peut donc estimer que sur ces sols, les risques de toxicité sont faibles. En sol non calcaire, la végétation est réduite par des apports de sulfate de chrome. Cette toxicité se manifeste aussi par une diminution de la teneur en acide phosphorique de la plante en liaison avec une diminution de la teneur en acide phosphorique assimilable du sol. Pour prévenir cette toxicité il faut incorporer au sol, soit un amendement calcaire, soit du phosphate de calcium. Dans la pratique agricole, les apports de phosphore en sols acides sont souvent réalisés avec des scories de déphosphoration ; cet engrais convient probablement très bien pour diminuer la toxicité du chrome puisqu'il four-

nit du phosphore et qu'il augmente aussi le pH du sol. Cette action favorable des scories peut aussi être obtenue par mélange de l'engrais avec les déchets de tanneries avant leur incorporation au sol.

Reçu pour publication en août 1968.

SUMMARY

CONTRIBUTION TO THE STUDY ON THE ACTION OF CHROMIUM ON THE GROWTH OF PLANTS

Wheat and tomatoes grown on soils to which Cr^{3+} oxide or sulphate has been added show that this element may affect the yield adversely.

This toxic property appears only when the chromium sulphate is added to an acid soil, and is also evinced by a lower phosphorus content of the plants. These toxic effects of chromium sulphate are suppressed by adding to the soil either calcium carbonate or monobasic calcium phosphate.

ZUSAMMENFASSUNG

BEITRAG ZUR UNTERSUCHUNG DER WIRKUNG DES CHROMS AUF DAS WACHSTUM DER PFLANZEN

Die Kulturen von Weizen und Tomaten auf Böden, die mit Cr^{3+} - Oxyd oder - Sulfat angereichert sind, haben gezeigt, dass dieses Element imstande ist, eine Ertragsminderung zu bewirken.

Diese Giftigkeit tritt nur zutage, wenn das Chromsulfat einem saueren Boden beigemengt ist und zeigt sich ferner durch eine Verminderung des Phosphorgehaltes der Pflanzen. Die Zufuhr von Kalziumkarbonat oder von monokalkigem Phosphat verhindert die giftige Wirkung des Chromsulfates im Boden.

РЕЗЮМЕ

К изучению действия хрома на рост растений.

Г. МУЛИНЬЕ, Роза МАЗУАЙЕ.

Опыты внесения окиси хрома или его сернокислой соли (Cr^{3+}) в почву, под культуры пшеницы и томатов показали что этот элемент может вызвать уменьшение урожайности.

Токсичность эта вызывает уменьшение содержания фосфора в растениях и проявляется только в случаях внесения сернокислого хрома в кислые почвы. Подкормка углекислым кальцием или однозамещенным фосфатом кальция нейтрализует токсичное действие сернокислого хрома.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

GERICKE S., 1943. Untersuchung über die Wirkung des Spurenelements Chrom auf das Pflanzenwachstum. *Bodenk u. Pfl.*, **33**, 114-125.

GROSMAN R., 1966. Le chrome dans le sol et la plante. Mise au point bibliographique. *Bull. Ass. fr. Ét. Sol.*, **3**, 115-124.

MACK DRACKE, 1964. In BEAR F. E., *Chemistry of the Soil.*, 425, Reinhold Publishing Corporation New-York.

SOANE B. D., SAUNDER D. H., 1959. Nickel and chromium toxicity of serpentine soils in Southern Rhodesia. *Soil Sci.*, **88**, 322-330.

STANFORD G., et *al.*, 1957. A method for measuring short-term nutrient absorption by plants : phosphorus. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **21**, 612-617.

VERGNANO O., 1959. La nutrizione fosforica in presenza di elemente micronutritivi e tossici nel terreno. *Agrochimica*, **3**, 262-269.

Ann. agron., 1968, **19** (5), 569-587.

ESSAI DE DOSAGE DES ÉLÉMENTS MINÉRAUX DANS LES VÉGÉTAUX

II. — Phosphore, chlore, potassium et calcium. Dosages chimiques et dosages par fluorescence X

Nicole SOUTY, R. GUENNELON
avec la collaboration technique de Colette Rode

Station d'Agronomie,
Centre de Recherches agronomiques du Sud-Est, 84 - Montfavet
Institut national de la Recherche agronomique

SOMMAIRE

Les auteurs tentent de mettre au point la technique de dosage par fluorescence X de P, Cl, K et Ca, dans les végétaux ; pour cela, ils ajoutent au végétal une certaine quantité de magnésie, qui a pour but d'atténuer les effets inter-éléments et « d'alourdir » la matrice. Dans ces conditions, cette méthode conduit à des résultats en bon accord avec ceux obtenus par les méthodes chimiques classiques et présente un sérieux avantage en ce qui concerne la rapidité de mesures pour des séries importantes, comprenant plusieurs éléments (au moins deux) à déterminer simultanément.

INTRODUCTION

Plusieurs auteurs (Ball et Perkins, 1962 ; Brandt et Lazar, 1958 ; Champion et Whitten, 1967 ; Chaussidon, 1962 ; Jenkins, Hurley et Shorrocks, 1966 ; Lazar et Beeson, 1958 ; Lytle, Dye et Seim, 1961 ; Mitcham et *al.*, 1964 ; Vose, 1961) se sont intéressés à l'application de la fluorescence X au dosage de certains éléments dans les plantes et les échantillons biologiques ; il semble cependant que la majorité d'entre eux se soient penchés sur le cas des oligo-éléments plutôt que sur celui des éléments majeurs, tels que Si, P, S, Cl, K et Ca. Néanmoins, nous avons relevé quelques travaux : ceux de Jenkins, Hurley et Shorrocks (1966) concernant les limites de détection pour un certain nombre d'éléments dans du matériel végétal parmi lesquels P, K et Ca ; ceux de Mitcham et *al.*, (1964) et ceux de Champion

et WHITTEN (1967) portant sur une comparaison fluorescence X-méthode chimique, d'une part pour le dosage du phosphore et du chlore dans le coton, l'accord semblant le meilleur dans le cas du phosphore, d'autre part pour le dosage du calcium dans des échantillons biologiques, l'accord étant excellent (tabl. 1).

TABLEAU 1

Comparaison fluorescence X
Méthodes chimiques d'après MITCHAM et *al.*, 1964 (Cl, P), CHAMPION et WHITTEN, 1967 (Ca)

	0/00	A	B	C	D	E	Foin	Foin
Phosphore	FX	0,3	23,5	29,0	26,0	25,0		
	Chimie	0	23,7	28,6	26,2	25,3		
Chlore	FX	13,6	12,2		11,7	13,0		
	Chimie	11,5	14,2		13,1	13,8		
Calcium	FX						28,5	60,2
	Chimie						28,2	59,7

L'intérêt de la méthode de dosage par fluorescence X dans le cas des éléments majeurs, réside dans le fait qu'elle évite la calcination et peut être réalisée, pour tous les éléments, sur une même pastille de végétal séché et broyé. Étant donné que la composition élémentaire d'une plante fournit des renseignements précieux sur ses besoins nutritifs, la fluorescence X peut constituer une méthode intéressante si elle permet une détermination plus rapide et plus commode que les méthodes chimiques et pour le moins aussi exacte. Cependant, cette technique d'analyse se heurte à de nombreuses difficultés liées à la nature même du matériel étudié ; effectivement, nous savons que les végétaux contiennent une certaine proportion d'éléments minéraux (de 3 à 15 p. 100 en général) et que ces éléments présentent une grande variabilité en ce qui concerne leurs teneurs respectives (tabl. 2).

TABLEAU 2

Constitution centésimale des cendres de trois plantes typiques
d'après DEMOLON (1946)

En p. 1 000	Grain de blé	Pommes de terre	Luzerne (floraison)
Si	0,45	0,90	0,52
P		7,50	4,2
S	0,7	2,6	4,8
K	27	50	22,8
Ca	2	1,8	23,4

De nombreux problèmes se posent donc en fluorescence X en raison de ces teneurs variables qui font que d'une part l'absorption du rayonnement d'excitation par la matière, diffère d'un végétal à un autre, et que d'autre part les effets inter-éléments : absorption du rayonnement de fluorescence et excitation mutuelle, n'ont pas toujours la même importance.

Notre travail a porté sur les essais de dosages de P, Cl, K et Ca dans les végétaux (le soufre a déjà fait l'objet d'un précédent mémoire, SOUTY et GUENNELON, 1967). Nous avons comparé les résultats des dosages par voie chimique et par fluorescence X pour plusieurs végétaux répartis en deux groupes : le groupe I comprenant des échantillons préparés au laboratoire, le groupe II dont l'étude avait pour objet de comparer les résultats de la fluorescence X à ceux obtenus par divers laboratoires dans des conditions de travail de routine.

I. — DOSAGES CHIMIQUES

Ces dosages ont été effectués sur 15 échantillons de végétaux finement broyés, préparés au laboratoire ; tous les résultats sont rassemblés dans les tableaux 3 et 4.

1° *Dosage du phosphore* : après avoir humecté le végétal avec de l'acétate de calcium, afin d'éviter des pertes de phosphore, nous avons calciné et le phosphore a pu être dosé sur la solution chlorhydrique à partir du complexe phosphovanadomolybdique.

2° *Dosage du chlore* : les mêmes précautions avant calcination ont été prises pour le dosage du chlore qui est ensuite effectué selon la méthode de Volhard.

Parallèlement, nous avons dosé le chlore sur la solution provenant de l'oxydation du végétal dans la bombe à oxygène : c'est d'ailleurs sur cette même solution que nous avons déterminé le soufre (SOUTY et GUENNELON, 1967). L'accord entre les résultats, donc entre les deux techniques de mise en solution, semble correct quoique les valeurs obtenues à partir de l'oxydation dans la bombe soient un peu plus faibles que celles atteintes à partir de la calcination au moufle.

3° *Dosage du potassium* : la minéralisation a été effectuée par voie sèche et on a procédé aux mesures par photométrie de flamme à l'aide d'un spectrophotomètre Eppendorf et d'un spectrophotomètre Beckman DU. Ces deux appareils conduisent à des valeurs comparables.

4° *Dosage du calcium* : les concentrations en calcium ont été déterminées sur la solution qui nous a permis précédemment de doser le potassium ; comme dans les végétaux la concentration en phosphore est faible devant celle en calcium, nous avons supprimé le passage sur résines anioniques.

Cependant, des aliquotes de cette solution injectées à quelques minutes d'intervalle, dans le photomètre Eppendorf et dans le photomètre Beckman, ne donnent pas les mêmes valeurs pour les concentrations, les premières étant plus fortes que les secondes.

Pour essayer d'éliminer ces difficultés, nous avons réalisé sur la même solution mère, le dosage par potentiométrie en présence de EGTA (ROBIN, 1963) : les résultats se rapprochent de ceux atteints à l'aide du spectrophotomètre Eppendorf. Ce dosage

au moyen de l'EGTA est inspiré des méthodes employées par différents auteurs (SCHMID et REILLEY, 1957 ; REILLEY et SCHMID, 1958, 1959 ; SADEK, SCHMID et REILLEY, 1959 ; LEWIS et MELNICK, 1960).

Enfin, pour s'assurer des valeurs trouvées, nous avons effectué le dosage en photométrie d'émission en présence de EDTA, selon la méthode décrite par WEST et COOKE (1960). Ce processus permet d'éliminer les interférences d'anion puisque l'EDTA forme un complexe avec le calcium ; de plus, l'intensité de l'émission est considérablement augmentée par suite d'un phénomène d'excitation.

Les valeurs des concentrations obtenues dans ces conditions, au spectrophotomètre Beckman, rejoignent celles obtenues à l'aide de l'appareil Eppendorf. En résumé, pour le calcium, nous possédons trois séries de résultats en bon accord : photométrie de flamme (Eppendorf), photométrie précédée d'une complexation avec l'EDTA (Beckman) et titrage potentiométrique par l'EGTA.

II. — DOSAGES PAR FLUORESCENCE X

Les manipulations ont été effectuées sur des appareils Siemens (spectromètre manuel et spectromètre séquentiel SRS). Les conditions opératoires sont les suivantes :

— *Spectromètre manuel.*

Anticathode de Cr,
Alimentation du tube à rayons X :

35 kV-34 mA pour le phosphore
25 kV-34 mA pour le chlore
25 kV-24 mA pour le potassium et le calcium

Canal de discrimination :

a) Seuil : 10 volts
largeur : 11 volts } (P)

b) seuil : 14 volts
largeur : 20 volts } (Cl)

c) sans discrimination (K et Ca)

— Compteur à flux gazeux

Cristal de gypse (2 d = 15,185 A)
Fentes du compteur : 0,15°
Comptage des impulsions { 5 fois 1 minute pour phosphore et chlore
5 fois 0,4 minute pour potassium et calcium

— *Spectromètre SRS.*

Anticathode de Cr,
Alimentation du tube à rayons X :

35 kV-34 mA pour le phosphore
30 kV-20 mA pour le chlore
30 kV- 8 mA pour le potassium et le calcium

Canal de discrimination

seuil : 13 volts
largeur : 15 volts } pour les 4 éléments

Compteur à flux gazeux
Cristal de pentaérythrite (2 d = 8,750 A)
Fentes du compteur : 0,15°
Comptage des impulsions : 1 minute

Nous avons fabriqué des pastilles à partir du matériel végétal séché et broyé et, sur une même pastille, nous avons déterminé les concentrations en P, (S), Cl, K et Ca.

Le problème le plus délicat réside dans la réalisation de pastilles de standards et de végétaux comparables du point de vue absorption. Comme l'a montré GUENNELON (1966) et l'ont repris SOUTY et GUENNELON (1967), l'apport à l'échantillon de végétal d'une quantité déterminée et constante de magnésie permet, d'une part, d'atténuer les effets inter-éléments et, d'autre part, « d'alourdir » la matrice puisque l'absorption de la magnésie pour les différentes raies Kα de ces éléments est plus forte que celles des atomes de C, O et N de la matière organique végétale. C'est pourquoi, pour les gammes (ensemble de standards de teneurs différentes en l'élément à doser), nous avons fait des pastilles contenant exactement la même quantité de magnésie que les pastilles de végétaux, soit : 1 g de MgO, 1 g de végétal, 1 g de cellulose et 1 g de MgO, x g de sel (contenant l'élément à doser), (2 — x) g de cellulose pour l'utilisation du spectromètre SRS ; 0,5 g de MgO, 2 g de végétal et 0,5 g de MgO, y g de sel et (2 — y) g de cellulose, pour l'utilisation du spectromètre manuel.

Outre le fait que les pastilles des gammes doivent avoir une absorption de même importance que les pastilles des végétaux, nous avons eu quelques difficultés pour un choix judicieux du sel contenant l'élément à doser et aussi pour la marche à suivre lors de la réalisation des pastilles synthétiques. D'autre part, nous constatons une évolution des pastilles de végétaux au cours du temps : le nombre d'impulsions recueillies sur les diverses raies n'est pas le même sur une pastille de fabrication récente et sur une pastille ayant déjà subi l'action du vide et des rayons X et ayant été fabriquée depuis quelques mois.

Nous allons, dans ces conditions, envisager successivement les problèmes se rapportant aux effets inter-éléments, à la réalisation de gammes synthétiques satisfaisantes et à l'évolution des pastilles de végétaux ; dans un dernier paragraphe, nous exposerons les différents dosages effectués.

1° *Effets inter-éléments*

Nous entendons par effet inter-élément, l'excitation secondaire d'un élément par les raies de fluorescence des éléments de numéro atomique plus élevé, entraînant une erreur par excès, et l'absorption par des éléments de numéro atomique plus faible, conduisant à une erreur par défaut.

Nous avons réalisé des pastilles synthétiques à partir de mélanges contenant P, S, Cl, K et Ca (sels d'ammonium pour P, S et Cl et carbonates pour K et Ca) ; dans le domaine de concentrations fréquemment trouvées dans les végétaux, il semble que potassium et calcium soient sans effet notable sur le phosphore, le soufre et le chlore. Expérimentalement, le nombre d'impulsions recueillies sur le pic de la raie Kα du phosphore, pour des teneurs de 1 500 p.p.m. à 3 000 p.p.m. ne varie pas dans des mélanges contenant de 0 à 20 000 p.p.m. de calcium et de 0 à 30 000 p.p.m. de potassium ; il en est de même pour le soufre comme nous l'avons déjà constaté. Le cas du chlore est peut-être un peu différent : des concentrations de 0 à 12 000 p.p.m. de calcium et de 0 à

25 000 p.p.m. de potassium ne semblent pas modifier le nombre d'impulsions, alors que des teneurs plus fortes conduisent à une diminution de ce nombre d'impulsions recueillies sur le pic Kα, (il s'agit vraisemblablement d'une absorption par K et Ca, des radiations d'excitation de la raie Kα du chlore, c'est-à-dire la raie K de l'anticathode de Cr). Parallèlement, nous observons que P, S et Cl sont sans effet les uns sur les autres et que, par contre, l'intensité de la raie Kα du calcium est fortement modifiée par la teneur en potassium : ceci se traduit par une diminution du nombre d'impulsions enregistrées sur la raie Kα du calcium au fur et à mesure d'une augmentation de la concentration en potassium. Les figure 1 et 2 rendent compte de ces différents effets : la figure 1 montre que le calcium n'a pas d'influence sur l'intensité de la raie Kα du potassium, alors que la figure 2 met en évidence l'action du potassium sur la raie du calcium : les courbes tracées représentent le nombre d'impulsions pour la raie Kα du calcium (pour différentes concentrations 2 000, 6 000, 8 000, 12 000, 20 000, et 30 000 p.p.m.) en fonction de teneurs en potassium croissantes de 0 à 80 000 p.p.m.

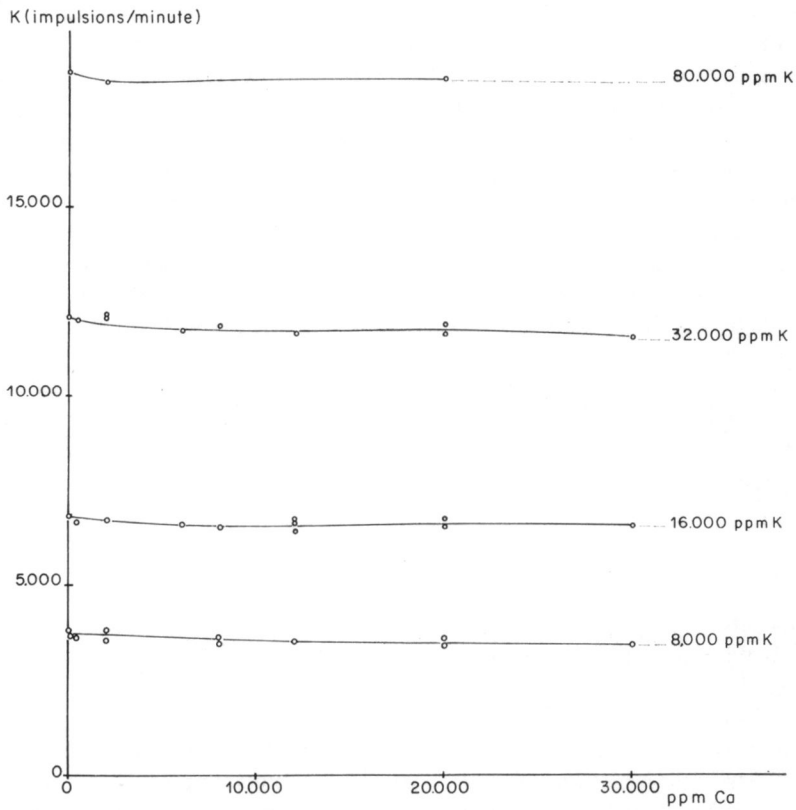


FIG. 1. — *Influence de Ca sur la raie* Kα *de K* (sans magnésie)

Nous avons essayé de rendre compte théoriquement de l'absorption de la raie du calcium par le potassium en considérant les mêmes pastilles que celles utilisées pour tracer les courbes expérimentales de la figure 2. Pour cela, nous avons supposé que l'excitation des atomes n'est produite que par la radiation Kα du chrome constituant l'anticathode ; les calculs ont conduit à une relation exprimant l'intensité de la raie Kα

du calcium en fonction de la concentration en potassium : la courbe théorique ainsi tracée (fig. 3) pour 20 000 p.p.m. de calcium suit la courbe expérimentale. Malheureusement, une telle relation :

$$\left(\frac{I}{k}\right)_{Ca} = \frac{\alpha\, C_{Ca}}{\alpha'\, C_{Ca} + \beta\, C_k + \gamma}$$

qui peut s'écrire aussi :

$$C_{Ca} = \left(\frac{I}{k}\right)_{Ca} \frac{\beta\, C_k + \gamma}{\alpha - \alpha' \left(\frac{I}{k}\right)_{Ca}}$$

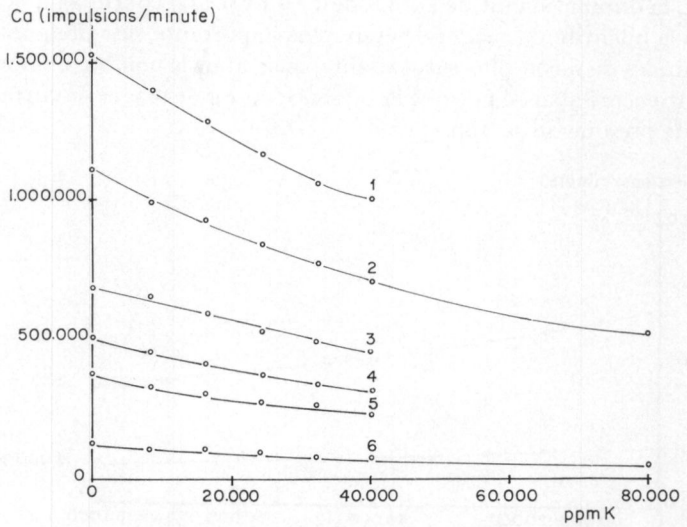


FIG. 2. — *Influence de K sur la raie Kα de Ca* (sans magnésie)

1 : 30.000 ppm Ca — 4 : 8.000 ppm Ca
2 : 20.000 " " — 5 : 6.000 " "
3 : 12.000 " " — 6 : 2.000 " "

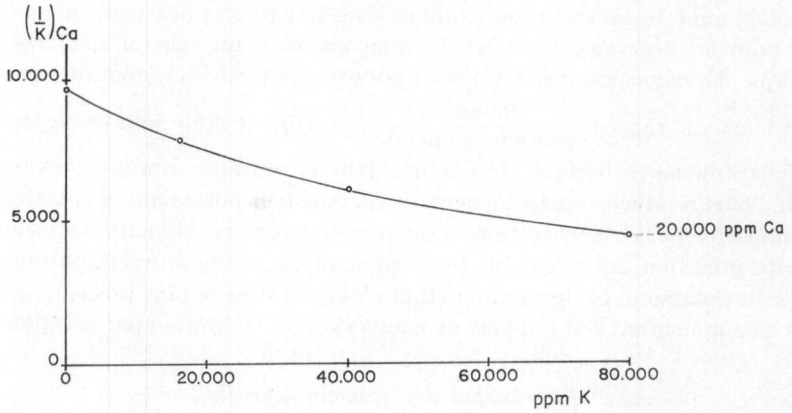


FIG. 3. — *Courbe théorique représentant la variation de* $\left(\frac{I}{k}\right)_{Ca}$ *en fonction de la concentration en K*

ne permet pas d'atteindre de façon précise la concentration en calcium par le calcul, étant données les approximations faites pour chaque terme.

Dans ce qui précède, nous avons considéré les effets inter-éléments dans des pastilles ne contenant pas de magnésie ; de la même façon, nous avons envisagé le cas où ces pastilles contiennent une quantité connue de magnésie, à savoir 1 g pour un poids total de 3 g. A partir de pastilles de mêmes concentrations que précédemment (P, S, Cl fixes et K, Ca variables) auxquelles nous avons ajouté de la magnésie, nous avons obtenu les courbes de la figure 4. Nous avons constaté ainsi que l'effet du potassium sur le calcium n'était pas entièrement tamponné ; pour un même intervalle de concentrations en potassium, le nombre d'impulsions recueillies sur le pic Kα du calcium diminue encore de 40 p. 100 ; cependant, pour le domaine de concentrations concernant les végétaux, la diminution est de l'ordre de 10 à 15 p. 100 contre 25 à 30 p. 100 sans magnésie. Si la quantité de magnésie était plus importante, les effets inter-éléments seraient diminués de façon plus satisfaisante, mais alors le nombre d'impulsions enregistrées serait encore abaissé puisque la présence de 1 g de magnésie entraîne déjà une diminution de presque 40 p. 100.

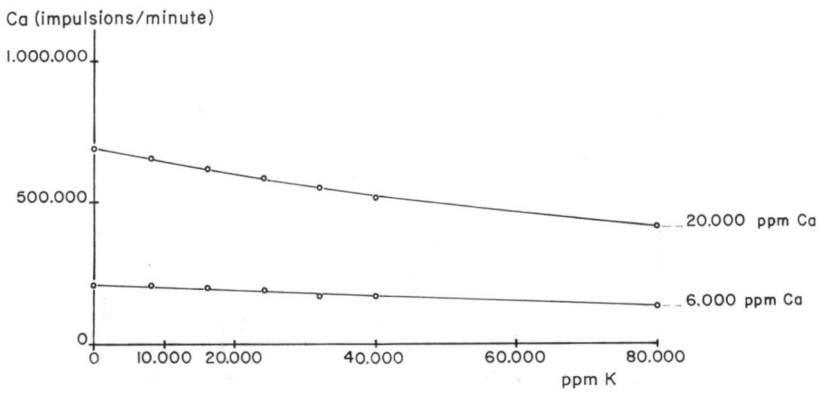


FIG. 4. — *Influence de K sur la raie Kα Ca en présence de magnésie*

Évidemment, le cas théorique examiné dans ce paragraphe constitue un cas défavorable pour les végétaux ; en effet, la comparaison d'un végétal avec une pastille synthétique de mêmes concentrations en potassium et calcium, aboutit par exemple à des valeurs du rapport $\frac{\text{magnésie}}{\text{matières minérales}}$ passant de 9,86 pour le végétal à 2,83 pour l'échantillon synthétique. D'ailleurs, dans la pratique, comme nous le verrons plus loin, l'effet résiduel, éventuellement dû à la teneur en potassium, n'entraîne pas sur la détermination de la concentration en calcium, une erreur systématique incompatible avec l'interprétation agronomique. De toute manière, le nombre d'impulsions sur les raies Kα du potassium et du calcium étant élevé, un dosage plus précis pourrait être effectué en augmentant soit l'apport de magnésie, soit la dilution par la cellulose.

2° *Fabrication des gammes (standards)*

Pour déterminer la concentration en chacun des éléments d'un échantillon, nous nous sommes reportés à des comptages effectués sur des pastilles synthétiques. Pour réaliser ces standards, nous avons choisi respectivement pour P, Cl, K et Ca, les sels suivants :

le phosphate monoacide d'ammonium $PO_4H(NH_4)_2$;
le chlorure d'ammonium $ClNH_4$;
les carbonates de potassium et de calcium.

Nous avons considéré le cas du chlore, une pastille standard contenant 1 g de MgO, x g de $Cl\,NH_4$ et $(2 - x)$ g de cellulose ; pour la fabriquer, nous avons tout d'abord mélangé simultanément les trois constituants, et avons répété 10 fois cette même opération conduisant à 10 pastilles pour lesquelles les comptages sur la raie Kα du chlore sont rassemblés dans le tableau 3 (col. 1 et 2). Pour une teneur de 5 p. 1 000 de chlore, nous avons constaté un écart maximum de 19 084 coups/minute et pour 10 p. 1 000 de chlore, cet écart est de 11 402 coups/minute. Les erreurs commises lors de l'élaboration d'une gamme sont donc très importantes et peuvent aboutir à un mauvais tracé de la droite d'étalonnage. Par contre, des pastilles faites en mélangeant soit la magnésie à une certaine quantité d'un mélange cellulose-sel préalablement obtenu, soit la cellulose à un mélange magnésie-sel, donnent des résultats plus reproductibles (tabl. 3 : col. 3). Cette remarque rejoint celle concernant la bonne reproductibilité des comptages du nombre d'impulsions sur une raie d'un élément dans un végétal ; les comptages ont été effectués sur la raie Kα du soufre, sur 10 pastilles différentes de tomate et de luzerne, et nous avons trouvé respectivement des valeurs moyennes de $39\,241 \pm 73$ et $5\,849 \pm 39$ impulsions/minute avec un écart-type de ± 232 et ± 125. Nous avons pensé que dans ce cas, les comptages sont reproductibles parce que l'élément dosé, en faible quantité, est intimement lié au reste de la matière ; c'est pourquoi, semble-t-il, nous avons obtenu des résultats plus satisfaisants sur des pastilles synthétiques, lorsque nous avons mélangé d'abord l'élément à doser à un des autres constituants (ce qui nécessite aussi des pesées plus importantes de sel).

TABLEAU 3

Reproductibilité sur des pastilles contenant du chlore

Cl = 5 p. 1 000 (1)	Cl = 10 p. 1 000 (2)	Cl = 5 p. 1 000 (3)
25 708	63 298	40 859
32 946	61 004	39 530
30 133	54 986	42 067
26 276	58 797	42 699
31 465	58 977	46 682
29 815	64 255	44 187
28 952	52 853	38 611
37 233	54 070	41 304
44 792	58 402	—
32 339	62 363	—

Dans ce qui précède, nous nous sommes intéressés à la fabrication même de la pastille ; mais par ailleurs, nous avons contrôlé le nombre d'impulsions enregistrées sur les différentes gammes quelques semaines après leur fabrication, donc après plusieurs expositions aux rayons X. Nous n'avons pas observé de variation significative, excepté

pour la gamme de chlore qui, pour toutes les concentrations, présente une nette augmentation du nombre d'impulsions ; un tel phénomène ne peut s'expliquer que par une diffusion du chlorure d'ammonium vers la surface en présence d'humidité.

3° *Évolution des pastilles de végétaux*

Pour les 4 éléments étudiés sur les échantillons de végétaux du groupe II, nous avons constaté au cours des différents passages des pastilles dans le rayonnement X, une variation du nombre d'impulsions recueillies sur les raies Kα. De façon générale, le nombre d'impulsions croît au cours du temps et nous avons pu approximativement établir que l'augmentation va en croissant dans le sens : P, Ca, K, Cl et est très importante pour le chlore essentiellement. Le phosphore entrant principalement dans des combinaisons organiques stables, il est satisfaisant de ne pas noter de modification au cours du temps ; le potassium, par contre, n'existe pas nécessairement à l'état de combinaisons organiques stables et des fractions importantes de cet élément peuvent se présenter sous forme soluble dans l'eau : il en résulte donc une évolution possible. Quant au chlore, nous avons pu grossièrement vérifier qu'il passait à l'état d'ion : en effet, nous avons immergé dans l'eau une pastille d'un végétal quelconque et au bout de 12 heures environ, nous avons constaté la présence d'ion Cl^- dans la solution. Nous pouvons, dans ces conditions, avancer l'hypothèse qu'une grande proportion de chlore dans les végétaux intervient sous forme ionique et peut donc migrer en surface sous l'action de l'humidité, entraînant avec lui certains cations.

TABLEAU 4

Dosages chimiques et dosages par fluorescence X de P et Cl sur les végétaux du groupe I

Végétaux	P		Cl		
	Chimie ‰	Fluorescence ‰ avec MgO	Chimie		Fluorescence ‰ avec MgO
			oxydation ‰	bombe ‰	
Paille de riz	0,52	0,51	10,18	11,60	8,33
Choux-fleurs (pommes)	5,02	4,94	3,73	3,28	2,61
Pommiers (feuilles)	3,62	3,66	18,33	15,88	14,25
Choux-fleurs (feuilles)	3,13	3,07	10,53	10,33	8,89
Épinards	5,38	5,02	—	5,55	4,86
Riz (grains)	2,70	3,12	—	0,51	0,73
Salades (frisées)	3,78	3,80	20,60	21,50	19,16
Pruniers (feuilles)	3,52	3,53	0,21	0,55	0,62
Sainfoin	5,85	6,19	0,92	0,99	1,26
Carottes (fanes)	3,44	3,28	6,10	4,93	5,53
Betteraves (fourragères)	4,34	4,73	38,46	31,48	—
Poireaux	2,84	2,43	2,22	1,59	1,87
Betteraves (sucrières)	5,10	3,88	18,53	—	13,99
Fèves (feuilles)	3,06	3,31	12,13	10,33	10,99
Choux (feuilles)	3,14	3,59	2,93	2,50	2,76

En résumé, certaines précautions doivent être prises lors de la détermination de la concentration en un élément dans un végétal ; tout d'abord les gammes doivent être

TABLEAU 5

Dosages chimiques et dosages par fluorescence X de K et Ca les végétaux du groupe I

Végétaux	K			Ca				
	Photométrie ‰		Fluorescence ‰ avec MgO	Photométrie ‰			Potentiométrie ‰	Fluorescence ‰ avec MgO
	Eppendorf	Beckmann		Eppendorf	Beckmann	Beckmann EDTA		
Paille de riz	25,4	26,2	26,05	6,83	6,17	6,33	6,83	6,28
Choux-fleurs (pommes)	47,25	51,25	50,95	4,41	2,58	3,66	3,99	4,00
Pommiers	36,00	36,30	36,76	8,50	5,17	7,26	7,88	7,62
Choux-fleurs (feuilles)	42,25	44,75	42,69	36,40	30,50	32,00	33,74	27,16
Épinards	89,00	97,00	91,78	15,50	12,00	14,66	15,49	11,30
Riz (grains)	3,53	3,53	3,51	1,00	0,50	1,07	1,78	1,90
Salades (frisées)	47,25	50,35	43,33	34,24	30,25	32,40	32,20	20,87
Pruniers (feuilles)	28,00	27,80	32,87	13,70	9,70	12,53	13,38	12,70
Sainfoin	9,40	9,80	11,14	13,75	8,50	13,20	13,20	13,71
Carottes	27,40	28,20	33,46	4,25	2,33	4,66	3,76	4,42
Betteraves (fourragères)	29,40	29,80	31,82	10,96	8,46	11,06	11,10	11,73
Poireaux	16,60	17,60	19,82	11,50	9,91	13,86	13,75	10,37
Betteraves (sucrières)	39,40	37,60	41,59	9,33	7,66	11,40	9,30	7,33
Fèves (feuilles)	19,60	19,20	19,72	26,12	21,60	28,50	25,60	23,56
Choux (feuilles)	19,70	20,50	22,62	18,37	14,50	20,60	18,70	18,37

fabriquées de préférence à partir de mélanges contenant la magnésie d'une part et le mélange sel-cellulose d'autre part. Ensuite, il serait préférable de réaliser une gamme nouvelle pour chaque série d'analyses afin de comparer dans les mêmes conditions le végétal et le standard ; il est donc utopique de conserver des pastilles plusieurs mois en vue de passages ultérieurs en fluorescence X. Nous étudions d'ailleurs actuellement les possibilités de définir des conditions de conservation des gammes plus satisfaisantes, et de concevoir une réalisation de standards évoluant plus lentement.

4° *Dosages effectués*

Nous avons entrepris les dosages de P, Cl, K et Ca sur les végétaux du groupe I et de P, K et Ca sur les végétaux du groupe II. Les tableaux 4 et 5 contiennent ces divers résultats ; les manipulations relatives au groupe I ont été faites sur le spectromètre manuel et sur le spectromètre SRS en ce qui concerne le groupe II.

Dans les deux cas, les végétaux avant pastillage ont été séchés à l'étuve ; la magnésie a été préalablement calcinée et nous avons vérifié l'absence des éléments à doser dans la magnésie et la cellulose.

III. — COMPARAISON DES RÉSULTATS ET DISCUSSION

Nous allons examiner successivement les résultats des dosages des différents éléments sur les deux séries de végétaux.

1° *Végétaux du groupe I*

Nous avons en présence plusieurs séries de résultats se rapportant d'une part aux dosages chimiques dont nous avons parlé dans le chapitre I et d'autre part aux dosages par fluorescence X à l'aide du spectromètre manuel (c'est-à-dire à partir de pastilles contenant 2 g de végétal et 0,5 g de magnésie).

Dans le cas du dosage du phosphore, l'accord entre méthode chimique et fluorescence est correct, excepté pour l'échantillon « betteraves sucrières » qui conduit par colorimétrie à un résultat beaucoup plus fort que par fluorescence X : il est à noter que le mode opératoire utilisé n'exclut pas une influence gênante de la silice sur la colorimétrie du phosphomolybdate.

Par contre, le dosage du chlore présente une plus grande dispersion et dans la plupart des cas, le résultat de la fluorescence X est plus faible que les résultats chimiques ; seuls les trois échantillons de faible teneur ne correspondent pas à cette remarque. D'après les constatations relatives au dosage du chlore par fluorescence X décrites dans le troisième paragraphe du chapitre II, nous n'avons pas été étonnés de ces résultats puisque les pastilles synthétiques de $ClNH_4$ et celles de végétaux se modifient au cours du temps ; de plus, la fabrication des gammes ayant été antérieure à celle des pastilles de végétaux, le nombre d'impulsions recueillies sur la raie $ClK\alpha$ de $ClNH_4$ a augmenté et la détermination de la concentration en Cl du végétal a été faite par défaut.

Le tableau 4 rassemble toutes les valeurs obtenues pour ces deux dosages.

Les trois séries de résultats concernant le dosage du potassium sont satisfaisantes, bien que la fluorescence X aboutisse à des valeurs généralement un peu plus fortes

que celles données par la photométrie de flamme, à une exception près (salades frisées). Cependant, cette erreur par excès peut provenir d'une valeur incorrecte de la quantité de potassium contenue dans le carbonate de potassium du commerce ; effectivement, après vérification, nous avons trouvé que 1 g de carbonate utilisé ne contenait que 0,5 g de K au lieu de 0,56 g stœchiométriquement. Si nous examinons enfin les résultats relatifs au dosage du calcium (en éliminant ceux obtenus à partir du spectrophotomètre Beckman, pour les raisons signalées dans le chapitre I), nous avons en présence quatre séries de valeurs et nous constatons que la fluorescence X conduit à des résultats comparables à ceux des autres méthodes ; nous remarquons cependant que les valeurs données par la fluorescence X pour les échantillons : choux-fleurs (feuilles), épinards et salades frisées, sont très faibles par rapport à celles atteintes par voie chimique. Ces trois échantillons contenaient beaucoup de potassium soit en forte proportion par rapport au calcium (épinards), soit en proportion comparable au calcium (choux-fleurs et salades frisées) ; nous pouvons supposer alors que l'effet du potassium sur le calcium n'est pas totalement « tamponné » par la présence de 0,5 g de magnésie.

2° *Végétaux du groupe II*

Les dosages chimiques de P, K et Ca ont été effectués par le laboratoire expéditeur et les dosages par fluorescence X ont été réalisés sur le spectromètre SRS. Nous pouvons dire qu'il y a accord satisfaisant entre les résultats donnés par la fluorescence X et ceux qui nous ont été communiqués pour les autres méthodes. Pour interpréter ces résultats, nous avons effectué des calculs statistiques basés sur la méthode de l'axe majeur réduit (Imbrie, 1956). Dans cette méthode statistique, aucune des deux variables (résultats fluorescence X et résultat dosage chimique) n'est considérée comme la variable dépendante et l'équation de cet axe est déterminée en rendant minimum la somme des aires des triangles formés par les segments de droites tracés de chaque point à la droite recherchée, parallèlement aux axes (Liu et *al.*, 1966). A partir de chaque triangle, peut être construit un rectangle dont la diagonale possède un écart-type S_d qui représente la dispersion totale autour de l'axe majeur réduit. Les différentes grandeurs statistiques calculées à partir de cette méthode et rassemblées dans le tableau 5, sont les suivantes (Imbrie, 1956 ; Miller et Kahn, 1962) :

1) coefficient de corrélation

$$r = \frac{\sum (x - \bar{x})\,(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x - \bar{x})^2 \times \sum (y - \bar{y})^2}}$$

2) pente de la droite $\qquad a = \dfrac{S_y}{S_x}$

avec S_x = écart-type ou déviation standard $= \sqrt{\dfrac{(x - \bar{x})^2}{n - 1}}$

$$S_y = \sqrt{\frac{(y - \bar{y})^2}{n - 1}}$$

Si $\bar{x}$ = moyenne des x
$\bar{y}$ = moyenne des y
n = nombre d'échantillons

TABLEAU 6

Corrélation : dosages chimiques et
dosages par fluorescence X de P, K et Ca sur les végétaux du groupe II

Stations	Nombre échantillons	Domaine des concentrations déterminées, en %	Coefficient de corrélation r	Pente a	Erreur standard de la pente S_a	Ordonnée à l'origine b	Erreur standard sur b S_b	Écart-type de la diagonale S_d	Coefficient de dispersion relative D_d
Amiens	P* 32	0,16 à 0,32	0,782	1,294	0,143	— 0,085	0,033	0,03	10,32
	K** 32	0,67 à 2,20	0,889	0,866	0,070	0,22	0,107	0,21	9,76
	Ca**** 32	1,00 à 1,99	0,943	1,037	0,061	0,003	0,088	0,13	6,26
Clermont Ferrand	P* 18	0,07 à 0,51	0,971	1,015	0,058	— 0,023	0,014	0,014	4,9
	K** 18	1,25 à 4,65	0,978	0,906	0,045	0,103	0,126	0,30	8,54
	Ca*** 12	0,30 à 1,78	0,986	1,057	0,050	— 0,131	0,048	0,089	6,75
Dijon	P* 10	0,18 à 0,38	0,981	0,755	0,047	0,027	0,056	0,020	4,89
	K** 10	1,65 à 3,50	0,993	0,977	0,035	0,056	0,105	0,102	2,46
Toulouse	P* 35	0,07 à 0,31	0,942	0,879	0,050	0,004	0,011	0,010	3,81
	Ca** 35	0,23 à 1,85	0,965	1,022	0,045	— 0,014	0,038	0,133	12,28
Versailles	P* 24	0,03 à 0,35	0,951	0,754	0,047	0,023	0,012	0,054	20,28
	K** 24	0,28 à 2,2	0,992	1,007	0,026	0,092	0,031	0,12	8,33
	Ca** 24	0,02 à 3,88	0,998	0,932	0,012	0,016	0,018	0,116	11,65

* Colorimétrie au métavanadate.
** Photométrie de flamme.
*** Versénate au noir bleu au chrome.
**** Volumétrie oxalate et permanganate.

3) erreur standard sur la pente

$$S_a = \frac{S_y}{S_x}\sqrt{\frac{1 - r^2}{n}}$$

4) ordonnée à l'origine

$$b = \bar{y} - a\,\bar{x}$$

5) erreur standard sur l'ordonnée b

$$S_b = S_y\sqrt{\frac{1 - r^2}{n}\left(1 + \frac{\bar{x}^2}{S_x^2}\right)}$$

6) déviation standard de la diagonale

$$S_d = \sqrt{2\,(1 - r)\,(S_x^2 + S_y^2)}$$

7) coefficient de dispersion relative autour de l'axe majeur réduit

$$D_d = \frac{100\,S_d}{\sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2}}$$

Les coefficients de corrélation r sont satisfaisants, mais nous remarquons que pour chaque Station, leurs valeurs se classent par ordre croissant : phosphore-potassium-calcium, le groupe « Amiens » présentant les valeurs les plus faibles pour les trois dosages. La pente a prend des valeurs voisines de 1,000 (relation linéaire parfaite) excepté dans le cas du dosage du phosphore ; l'ordonnée b est voisine de 0. Les

TABLEAU 7

Résultats statistiques des dosages effectués par plusieurs laboratoires

g par kg M.S.	Foin de Graminées			Foin de Luzerne		
	P	K	Ca	P	K	Ca
Valeurs Fluorescence	1,3	14,0	5,2	2,5	18,4	13,0
Nombre de laboratoires.....	39	30	35	40	31	40
Moyenne (Chimie)	1,5	15,5	4,6	2,6	20,8	12,5
Écart type	0,19	1,24	0,49	0,20	1,53	0,88
Écart tolérable	0,38	2,48	0,98	0,40	3,06	1,76

valeurs de l'écart-type de la diagonale et de la dispersion relative reflètent l'importance de la dispersion des points autour de l'axe majeur réduit. Pour le phosphore, deux groupes de résultats ont un coefficient de dispersion élevé (Amiens et Versailles), alors que les trois autres ont un coefficient plus faible : étant donné que la méthode

utilisée est la même pour tous (colorimétrie du complexe phosphovanadomolybdique), ces différences peuvent provenir essentiellement soit de la façon dont est effectué le dosage (minéralisation comprise), soit de la nature des échantillons.

Pour le dosage du potassium, S_d présente des valeurs fortes et D_d est sensiblement le même pour les différentes Stations (Dijon excepté, par suite, peut-être, du plus petit nombre d'échantillons).

Pour le calcium, le coefficient de dispersion est voisin de 12 pour les dosages des Stations de Toulouse et Versailles, ayant utilisé le photomètre de flamme ; par contre, ce coefficient n'est plus que de 6 pour les échantillons de Clermont-Ferrand (dosage au versénate) et pour ceux de Amiens (volumétrie oxalate et permaganate).

Outre les dosages comparatifs effectués sur ces 119 échantillons, nous avons participé à une chaîne de dosages (chaîne A.F.Z.-A.F.T.A.A., 1967) concernant deux échantillons (graminées et luzerne) ; les valeurs atteintes par fluorescence X sont très satisfaisantes par rapport à celles données par les autres laboratoires comme le montre le tableau 7 dans lequel sont rassemblés les résultats statistiques. Nous remarquons cependant, que les valeurs des teneurs en phosphore et potassium sont plus faibles que les valeurs moyennes, alors que celles des teneurs en calcium sont plus fortes.

CONCLUSION

En résumé, nous pouvons considérer les résultats donnés par la fluorescence X comme corrects. En effet, les dosages effectués sur des échantillons dosés chimiquement selon des méthodes de routine par différents laboratoires ont abouti à des valeurs satisfaisantes. De plus, les calculs statistiques concernant la chaîne de dosages prouvent que les résultats de la fluorescence X se situent à l'intérieur du domaine de valeurs tolérables.

TABLEAU 8

Influence de la magnésie sur les résultats de deux dosages de calcium

‰	Chimie	FX 0,5 g MgO	FX 1 g MgO
Épinards	15,5 14,66 15,49	11,30	14,4
Choux-fleurs (feuilles)	36,40 32,00 33,74	27,16	32

En ce qui concerne les mauvais résultats pour le calcium obtenus sur trois végétaux du groupe I, il était intéressant de pouvoir refaire les dosages à l'aide du spectromètre SRS, sur des pastilles contenant 1 g de végétal pour 1 g de magnésie (et 1 g de

cellulose), afin de déterminer si la présence d'une plus grande quantité de magnésie diminue de façon plus satisfaisante l'effet du potassium sur le calcium. Nous avons pu réaliser ces nouveaux dosages sur des épinards et des choux-fleurs (feuilles), et avons obtenu des valeurs se rapprochant beaucoup plus de celles données par la méthode chimique (tabl. 8).

Ces nombreuses constatations permettent donc de dire qu'un dosage correct par fluorescence X des quatre éléments envisagés (P, Cl, K et Ca), est obtenu si la dilution du végétal sec et broyé est la suivante : 1 g de végétal, 1 g de magnésie et 1 g de cellulose, et si parallèlement, nous nous efforçons de réaliser des gammes de standards satisfaisantes, c'est-à-dire n'évoluant que très lentement au cours du temps.

Reçu pour publication en juin 1968.

SUMMARY

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF MINERAL ELEMENTS IN PLANTS

II. — PHOSPHORUS, CHLORINE, POTASSIUM AND CALCIUM

CHEMICAL AND X-FLUORESCENCE DETERMINATIONS

An agronomist may often require quickly fairly accurate information as to the contents of such elements as P, Cl, K and Ca. X-fluorescence apparently meets these requirements since the concentrations of such elements determined thereby agree pretty well with those derived from the more conventional chemical process.

The critical part of the problem lies in making pellets the standards and vegetable matter of which are comparable as regards absorptivity. Intake of a specific and constant amount of magnesia by the plant sample allows, on the one hand, to lessen the inter-element effects and, on the other, to make the matrix « heavier ». Other trouble may crop up when selecting the salt containing the element to be determined and the procedure for making the synthetic pellets. Also, the latter may change with time.

After comparing the results obtained from the chemical and X-fluorescence determinations on a large number of plants, it can be said that a proper determination carried out from the same pellet of dry vegetable matter, suitably crushed, (this applying to the four aforesaid elements, sulphur determination having been described elsewhere), is derived, provided that the vegetable matter be diluted in the following proportions : 1 gramme of vegetable matter, 1 gramme of magnesia and 1 gramme of cellulose and, of course, the greatest care be given to making the standard ranges of pellets.

ZUSAMMENFASSUNG

BESTIMMUNG DER MINERALISCHEN STOFFE IN DEN PFLANZEN P, CL, K UND CA :

CHEMIE UND RÖNTGENFLUORESZENZ

Für die landwirtschaftlichen Forschungen mag es wichtig sein, den Gehalt an Elementen wie P, Cl, K und Ca ziemlich schnell und richtig zu erhalten.

Die spektrochemische Analyse mit Röntgenfluoreszenz befriedigt diesen Bedingungen, weil die Konzentrationen dieser Elementen entsprechend mit den gewöhnlich benutzten chemischenMethoden bestimmt werden.

Die Verwirklichung mittels der Eichpastillen und der Probenpastillen, welche dieselben Massenabsorptionskoeffizienten besitzen, ist sehr schwierig. Die Zugabe einer bestimmten und konstanten Magnesiamenge an die Pflanzenproben erlaubt, einerseits den Interelementeffekt auszuscheiden, anderseits die Matrix zu « überladen ».

Ausserdem stösst man auf einige Schwierigkeiten für die Wahl des erforschten Element enthaltenden Salzes und für die Technik der Verwicklung der synthetischen Pastillen ; zuletzt beobachtet man eine Bewegung der Pflanzenspastillen im Laufe der Zeit.

Nachdem die Ergebnisse der für mehrere Pflanzen chemischen und spektrochemischen Analysen verglichen wurden, kann man beschliessen, dass eine richtige Bestimmung der vier genannten Elementen (die Schwefelbestimmung ist in einen anderen Text gelernt) erhralten wird, wenn 1 g Pflanze, 1 g Magnesia und 1 g Zellulose gemischt werden und wenn die Eichpastillen sorgfältig gemacht werden.

РЕЗЮМЕ

Опыт дозировки минеральных элементов в растении.
II *Фосфор, хлор, калий, кальций. Химические дозировки и дозаж при помощи флуоресценции X.*

НИКОЛЬ СУТИ, Р. ГЕННЭЛОН.

Быстрое получение достаточно точного содержания в растениях таких элементов как P, Cl, K и Ca может представить интерес для агронома. Флуоресценция X как-будто отвечает этим условиям, ибо этим способом возможно определить концентрации указанных элементов в полном согласии с результатами полученными с помощью обычных химических методов.

Самой сложной задачей является изготовление пастилок стандартов и пастилок близких по поглощению растений. Добавление к растительному образцу определенного и неизменного количества магния позволяет, с одной стороны сгладить меж-элементные эффекты, а с другой — « утяжелить » матрицу. Могут представиться, кроме того, некоторые трудности при выборе соли содержащей дозируемый элемент, и в процессе изготовления синтетических пастилок; можно также отметить некоторую эволюцию растительных пастилок во времени.

Сравнив результаты химических дозировок и дозажей проведенных с помощью флуоресценции X большого числа растений, можно сказать, что правильный дозаж четырех указанных элементов (способы дозировки серы были указаны ранее) в одной и той-же пастилке из высушенного и измельченного растения, получится в случае разбавления в следующей пропорции : 1 гр. растения, 1 гр. магния и 1 гр. клетчатки, и при правильном и осторожном изготовлении различных гамм стандартов.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BALL D. F., PERKINS D. F., 1962. Plant analysis by X-Ray fluorescence spectrography : determination of calcium and potassium. *Nature*, **194**, 1163-1165.

BRANDT C. A., LAZAR V. A., 1958. Analysis of dried plant material by X-Ray emission spectrograph. *J. agric. Food. Chem.*, **6**, 306.

CHAMPION K. P., WHITTEN R. N., 1967. The determination of calcium in biological samples by X-Ray fluorescence. *Analyst.*, **92**, 109-, 112-114.

CHAUSSIDON J., 1962. *Proc. Colloque de Madrid. Analyse par spectrométrie des R. X. de quelques éléments minéraux des végétaux.* Vol. 2., Philips Eindhoven.

DEMOLON A., 1946. *Croissance des végétaux cultivés.* p. 95.

GUENNELON R., 1966. Détermination du soufre dans les végétaux par spectrométrie X. (à paraître).

IMBRIE J., 1956. Biometrical methods in the study of invertebrate fossiles. *Bull. amer. Museum nation. Hist.*, **108**, Art. 2, 211-252.

JENKINS R., HURLEY P. W., SHORROCKS V. M., 1966. Plant mineral analysis by X-Ray fluorescence spectrometry. *Analyst.*, **91**, 1083, 395-397.

LAZAR V. A., BEESON K. C., 1958. The determination of copper and molybdenum in plants by X-Ray spectrography. *Ass. off. Agric. Chem.* Washington, **41**, 416.

LEWIS L. L., MELNICK L. M., 1960. Determination of calcium and magnesium with (ethylene dinitrilo) tetra-acetic acid. Studies in accuracy. *Anal. Chem.*, **32**, (1), 38-42.

LIU T. K., ODELL R. T., ETTER W. C., THORNBURN T. H., 1966. A comparison of clay contents determined by hydrometer and pipette methods using reduced major axis analysis. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **30** (6), 665-69.

LYTLE F. W., DYE W. B., SEIM H. J., 1961. Determination of trace elements in plant material by fluorescent X-Ray analysis. *Advances in X-Ray analysis*, **5**, p. 433. Plenum Press, New York.

MILLER R. L., KAHN J. S., 1962. *Statistical analysis in the geological sciences*, 204-205. John Wiley and Sons, New York.

MITCHAM D., PICCOLO B., TRIPP V. W., O'CONNOR R., 1964. X-ray fluorescence in cotton modification research. *Advances in X-ray analysis*, **8**, 456-461.

REILLEY C. N., SCHMID R. W., 1958. Chelometric titrations with potentiometric and point detection. Mercury as pM indicator electrode. *Anal. Chem.*, **30**, (5), 947-953.

REILLEY C. N., SCHMID R. W., 1959. Principles of end point detection in chlometric titrations using metallochromic indicators. Characterization of end point sharpness. *Anal. chem.*, **151**, (5), 887-97.

ROBIN J., 1963. La complexometrie. *Chim. anal. Fr.*, **45**, (10), 506-14.

SADEK F. S., SCHMID., REILLEY 1959. Visual EGTA titration of calcium in the presence of magnesium. *Talanta G. B.*, **2**, (1), 38-51.

SCHMID R. W., REILLEY C. N., 1957. New complexon for titration of calcium in the presence of magnesium. *Anal. Chem.*, **29**, (2), 264-68.

SOUTY N., GUENNELON R., 1967. Essai de dosages des éléments minéraux dans les végétaux. I. Soufre dosage chimique (bombe à oxygène) et dosage par fluorescence X. *Ann. agron.*, **18** (6), 653-667.

VOSE P. B., 1961. X-Ray spectrography of plant material. *Laboraty Practice*, 10-30.

WEST A. C., COOKE W. D., 1960. Élimination of anion interferences in flame spectroscopy. Use of (ethylene dinitrilo) tetra-acetic acid. *Anal. Chem.*, **32**, (11), 1471-74.

Ann. agron., 1968, **19** (5), 589-604.

NOTE TECHNIQUE

EXEMPLES D'APPLICATION DE LA MÉTHODE DE STANFORD — DE MENT A DES PROBLÈMES DE FERTILISATION PHOSPHATÉE

J. QUÉMÉNER

Station agronomique,
Société commerciale des Potasses d'Alsace, 68 - Aspach-le-Bas

INTRODUCTION

Deux chercheurs de la *Tennessee Valley Authority*, G. STANFORD et J. DE MENT, ont publié, il y a une dizaine d'années, une méthode destinée à la détermination rapide de l'assimilabilité à court terme d'engrais phosphatés ou potassiques de formule chimique ou de conditionnement physique différents. Les auteurs indiquaient la possibilité d'utiliser ultérieurement la technique pour la détermination de la fertilité naturelle phosphatée ou potassique de sols différents.

La présente note donne un exemple de la réalisation technique de cette méthode ; elle indique les performances dont elle est capable dans le domaine de l'étude de la fertilisation phosphatée, et plus particulièrement de problèmes liés à la technologie des engrais.

I. — PRINCIPE DE LA TECHNIQUE

On réalise une culture carencée soit en P, soit en K, sur un substrat inerte, dans un récipient privé de fond. Lorsqu'un feutrage de racines suffisamment abondant s'est développé à la base du pot, on peut soulever ce dernier et placer le tout dans un deuxième récipient de manière à mettre en contact les racines avec un sol renfermant ou non des engrais. Après un laps de temps pouvant varier de 1 à 20 jours, on récolte les plantes dans lesquelles on dose soit P, soit K.

Les avantages pratiques en sont surtout la rapidité puisque pour les comparaisons d'engrais, la culture ne dure guère plus de trois semaines. Le faible encombrement du matériel permet de faire en même temps des comparaisons très nombreuses, si bien que l'on peut suivre facilement des recherches, des démarrages d'usines pilotes, ou un contrôle de fabrication d'engrais.

L'avantage théorique paraît être le fait de mettre en présence des sols et des engrais, un réactif végétal de développement constant. En outre, si le temps de contact n'est pas trop long, les différences de nutrition minérale n'ont pas le temps d'avoir des répercussions sur le développement du végétal, si bien que l'on peut dire que les différences d'absorption constatées sont une fonction directe de l'état de l'élément dans le sol. En fait, cette invariance de la matière végétale se vérifie de façon assez irrégulière d'une série à l'autre ; mais la plupart du temps, les variations restent faibles, quoique parfois significatives.

Cette technique a été introduite à la Station d'Aspach pour des études de granulation de binaires phosphopotassiques. Elle a été employée depuis 1961 pour des problèmes concernant l'acide phosphorique. Sous une forme un peu modifiée, elle est appliquée de façon systématique depuis 1965, à l'étude du potassium des sols (D. ROLLAND, 1962).

II. — MODALITÉS D'EXÉCUTION A LA STATION D'ASPACH

Matériel utilisé (fig. 1)

Récipients. — Pour les premiers essais, ont été utilisés comme l'indiquaient les auteurs, des pots à crème en carton paraffiné. Ces pots se sont révélés peu résistants à l'usage et ont été rapidement remplacés par des boîtes en polyéthylène de forme carrée, ce qui procure un gain de place. Les dimensions en sont de 10 × 10 × 6 cm et leur poids très régulier facilite le tarage. Les récipients privés de leur fond sont placés dans des soucoupes carrées en lucoflex de 1 mm d'épaisseur, fabriquées sur place par emboutissage à chaud.

Support

Sable de la Valmasque à Biot, lavé 24 heures à l'acide chlorhydrique à 10 p. 100 à raison de 500 g par pot dont 100 au-dessus des graines.

Plantes

La quasi-totalité de nos essais a été réalisée avec l'orge. A l'origine, cette plante a été choisie surtout en raison de son homogénéité génétique et les coefficients de variations obtenus sont en général faibles, bien que différents avec les problèmes abordés. Actuellement, nous considérons que, bien qu'il s'agisse d'une plante à sodium, elle est beaucoup mieux adaptée à l'étude des problèmes potassiques qu'à ceux des phosphates. En effet, pendant la période de végétation utilisée (de 1,5 à 5 semaines après la levée environ), l'orge manifeste un pouvoir d'absorption assez élevé vis-à-vis du potassium, ce que l'on peut rapprocher de sa réaction modérée à la fumure potassique au champ. Son pouvoir d'absorption vis-à-vis du phosphore reste faible, et est très influencé par le pouvoir absorbant du sol.

La recherche d'autres plantes d'essais reste un de nos objectifs. La plante idéale devrait présenter les trois qualités suivantes : grande homogénéité, installation rapide des racines, permettant une mise en contact aussi précoce que possible avec le substrat, pouvoir d'absorption élevé vis-à-vis de l'élément étudié. On peut, pour des plantes de petite taille, compenser un défaut du premier critère par une augmentation de la population (400 mg de semences pour le ray-grass, soit environ 200 plantes germantes contre 30 pour les céréales). Toutefois, on ne peut, dans un espace et une durée aussi limités, augmenter la population sans risquer de voir diminuer le rapport de la quantité absorbée à la quantité présente dans les graines au départ, et quelquefois la première arriver à n'être que de l'ordre des

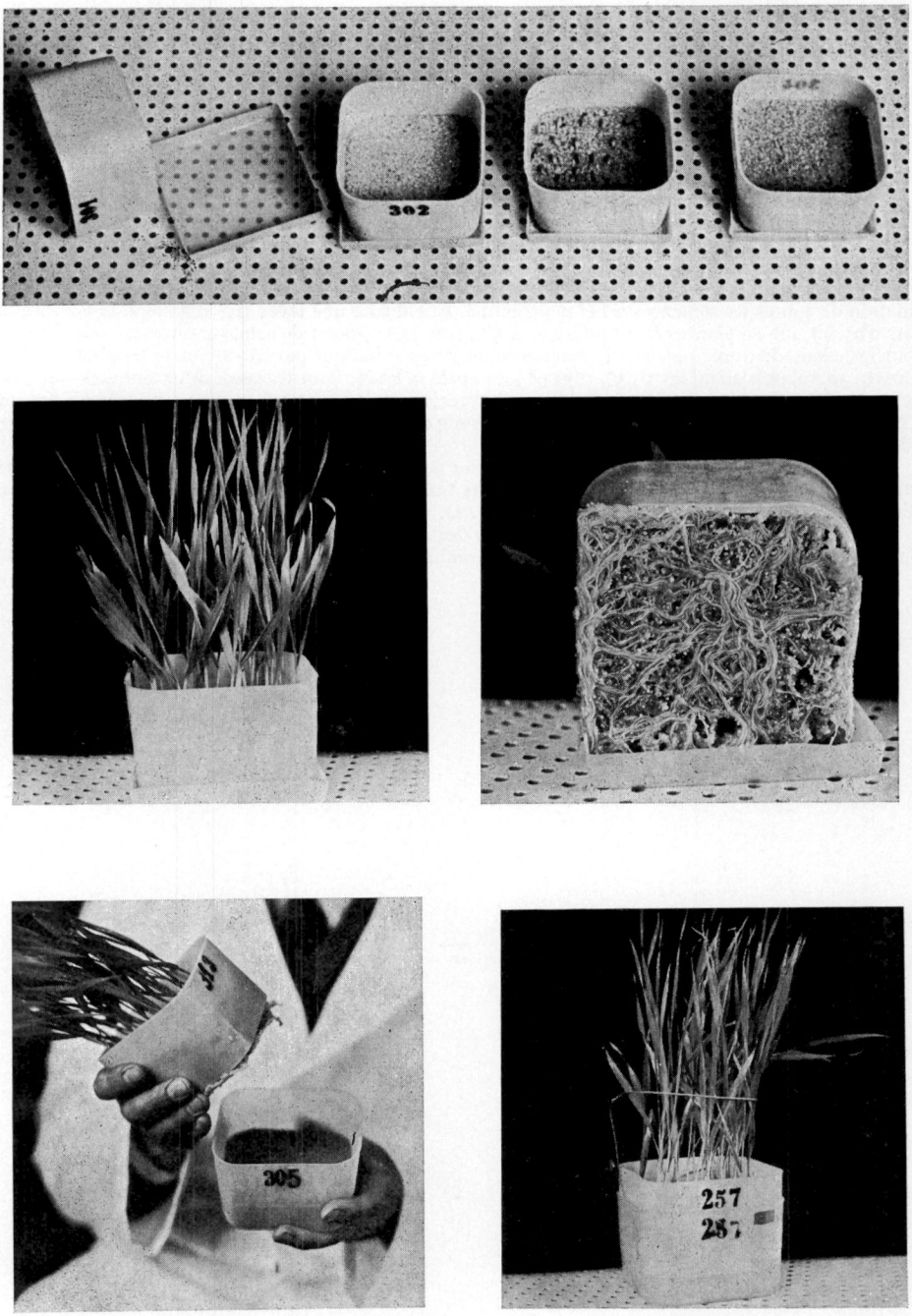


FIG. 1. — *De haut en bas : mise en place de la plante* (orge) *dans les récipients sans fonds. Culture carencée de 2 semaines* (à gauche) *et son matelas de racines* (à droite). *Transfert* (mise en contact des racines et du substrat) *et culture une semaine après transfert.*

erreurs de dosage de la seconde, ce que nous avons constaté lorsque nous avons essayé d'utiliser pour cette méthode la densité de semis des anciens Neubauer (100 plantes par pot). On trouvera, à la fin de cette note, quelques résultats obtenus avec d'autres plantes.

Soins en cours de culture

La conservation de la faculté germinative des semences d'orge n'étant pas toujours régulière, nous avons, après quelques déboires, adopté le mode opératoire suivant :

Les 30 graines sont mises à germer sur le sable imbibé de solution nutritive, sans les 100 g de sable de couverture, mais à l'abri d'un papier d'emballage assez fort pour limiter les pertes d'eau. Au bout de 48 heures, on procède au remplacement des graines ne présentant pas d'évolution nette du germe, par des graines préparées dans les mêmes conditions dans une « pépinière ». Cette façon de faire nous semble, pour les séries importantes, procurer un gain de temps par rapport à la manipulation de toutes les semences à l'état prégermé. Elle donne une levée très régulière, le nombre de pots n'ayant que 29 plantes étant inférieur à 5 p. 100. Les apports de solution nutritive ont été faits pour les essais de durée normale (3 semaines) au rythme indiqué par STANFORD et DE MENT, soit au départ : 50 ml, puis 20 ml les 3e, 5e, 7e et 9e jour après la levée. Pour les essais de phosphates, la solution est conforme aux indications, d'ailleurs peu précises de STANFORD et DE MENT et renferme 300 mg d'N, 300 mg de K (des nitrates de K et Ca) et 120 mg de Mg (du sulfate) par litre, ainsi que des oligo-éléments.

On rétablit tous les jours la tare avec de l'eau permutée, l'arrosage étant fait un jour sur deux par-dessous (dans la soucoupe) jusqu'au jour du transfert. Cette alternance paraît favoriser l'établissement des racines au fond du récipient (fig. 1).

Le transfert, c'est-à-dire la mise en contact des racines avec le sol ou le mélange sol-engrais, a d'abord été pratiqué le 15e jour après la levée, comme le préconisaient les auteurs (STANFORD et DE

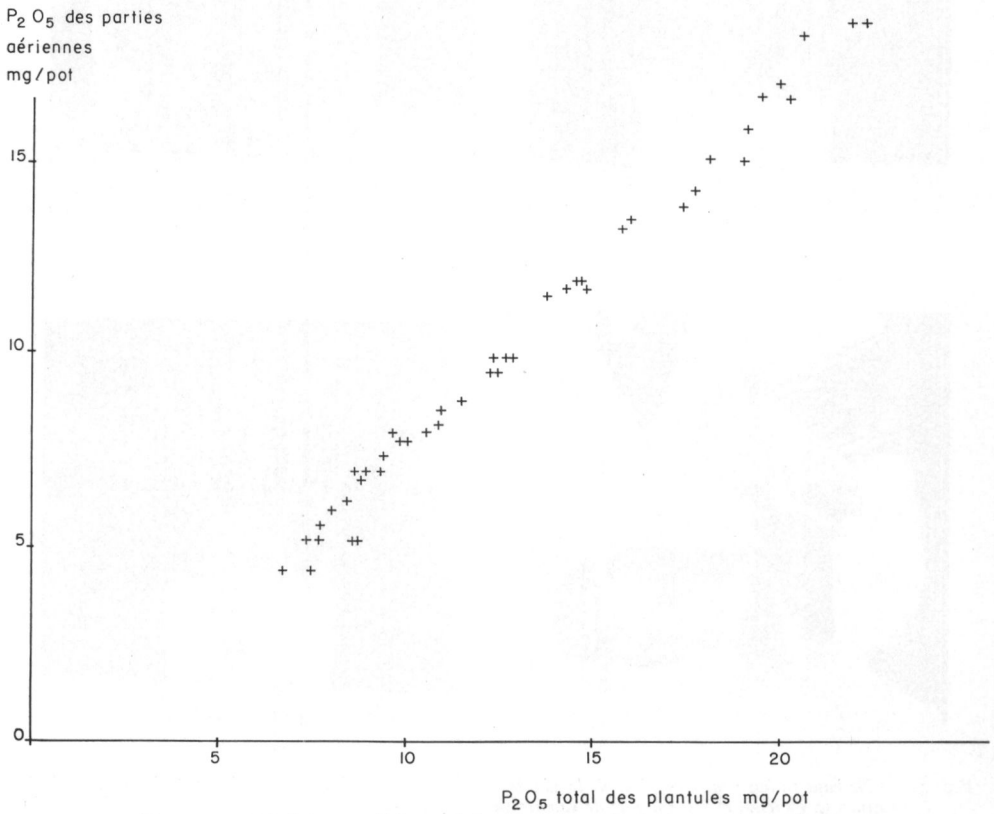


FIG. 2. — *Relation entre* P_2O_5 *total des plantules et* P_2O_5 *des parties aériennes*

MENT, 1957). Il nous est apparu assez rapidement qu'il était préférable de ne pas prolonger trop longtemps la période de culture carencée, la reprise des plantes après transfert pouvant être moins bonne. Dix jours de culture carencée (après la levée, soit quatorze après le semis) paraît être une durée préférable au-dessous de laquelle nous n'avons pas cherché à descendre, le feutrage radiculaire ne paraissant pas, pour une durée moindre, suffisamment solide pour permettre un transfert aisé. Quelques pots sont récoltés le jour du transfert pour servir de témoin. Les plantes reçoivent un tuteur sous la forme d'un cercle de fil métallique, pour éviter les enchevêtrements d'un pot à l'autre. La récolte a lieu le plus souvent une semaine après le transfert. Nous avons vérifié, après STANFORD et DE MENT, qu'il suffit de récolter les parties aériennes des plantules. Les quantités d'éléments renfermées dans les racines sont faibles, varient peu, et les quantités présentes dans les parties aériennes sont en relation très étroite et linéaire avec les quantités totales (fig. 2).

Mode d'expression des résultats

Comme STANFORD et DE MENT dans leur 1re publication, et comme d'autres auteurs, ayant utilisé la méthode depuis (VIRMANI et *al*, 1966), nous exprimons les résultats en mg de P ou de P_2O_5 présent dans les parties aériennes. En admettant l'invariabilité de la masse végétale produite pour une même durée de végétation, on pourrait songer à utiliser plus simplement la teneur en P des plantules, en s'abstenant de les peser, ce qui serait une simplification. Mais, comme nous l'avons déjà fait observer plus haut, il arrive que l'invariance de la matière sèche ne soit pas rigoureusement obtenue, sans qu'on puisse déceler la cause de ce phénomène (par suite peut-être de légères fluctuations d'une série à l'autre des conditions de végétation).

Standardisation

Les premiers essais ont été effectués dans la serre chauffée ou dans le hall de végétation de la Station. Plusieurs d'entre eux ont souffert de conditions d'ambiance défectueuse, et en outre, même lorsque l'aspect de la végétation était correct, les quantités de potassium ou de P_2O_5 absorbées à partir d'un même substrat variaient beaucoup d'une saison à l'autre, et étaient beaucoup plus faibles en hiver. Le fait a été signalé par d'autres auteurs (VIRMANI et *al*, 1966).

L'exécution de ces essais en conditions standardisées n'a été réalisée jusqu'à présent que d'une façon approchée, dans un local situé dans la cave de la Station. Nous y avons aménagé une table de culture de 3 m × 1,50 m, munie d'un éclairage artificiel pouvant supporter environ 300 petits pots. Le local ayant une température assez stable en toute saison (18 à 22°), la climatisation a été jusqu'à présent limitée à une ventilation énergique lorsque la température s'élève sous l'action des lampes, au-dessus d'une certaine valeur (26°).

La réalisation d'un éclairage artificiel, avec comme objectif l'obtention de résultats analogues à ceux fournis par les meilleures conditions naturelles (fin de printemps ensoleillé dans le hall de végétation), a nécessité quelques tâtonnements. Il apparaît nécessaire, pour avoir un pouvoir d'extraction suffisant, d'avoir environ 10 000 lux sur les plantes au départ. L'installation réalisée comprend 30 tubes de 125 watts de 1,50 m de long, placés à 10 cm les uns des autres et à 40 cm au-dessus de la table. Les intervalles entre les supports sont partiellement occupés par des tôles d'aluminium inclinées formant réflecteurs.

Pour des tubes neufs, l'éclairement est de 10 000 à 11 000 lux dans l'axe de la table, 8 000 à 9 000 près des bords, il tombe brusquement à 6 000 sous les extrémités des tubes. Ce manque de régularité provoque des effets de bordure assez marqués, ce qui nous a conduits à changer les pots de place tous les jours, moyennant quoi, le développement des plantes est satisfaisant et les absorptions sont du même ordre de grandeur qu'en serre, dans les meilleures conditions. Mais les caractéristiques des lampes évoluent assez rapidement, et au bout d'un millier d'heures, ne sont plus suffisantes. On obtient une luminosité assez constante en changeant un tube sur deux toutes les 500 heures.

III. — REPRODUCTIBILITÉ DES RÉSULTATS

Variabilité à l'intérieur d'un même essai

Les coefficients de variation sur les quantités exportées sont compris entre 7 et 15 p. 100 en général. Normalement, lorsqu'il n'y a pas d'incidents de fonctionnement, l'installation demi-standardisée donne des coefficients inférieurs à 10 p. 100 lorsqu'il s'agit de sols ou d'engrais à l'état de poudres. Les études de granulés donnent en général des résultats plus dispersés (12 p. 100 environ).

Reproductibilité d'un essai à l'autre

Les études de reproductibilité ont été jusqu'ici un peu gênées par l'évolution progressive de la réalisation de la technique.

Voici cependant les résultats obtenus dans 5 séries d'essais parallèles effectués sur un échantillon de sol d'Aspach fertilisé ou non (P_1 = 60 mg de P par pot du phosphate monocalcique, pour 200 g de terre).

Exporté mg/pot

Sér.	Témoin au transfert	P_0	P_1	P_2	P_4	Coeff. de variation %	Plus petites diff. significatives	
							P = 0,05	P = 0,01
1	2,04	2,13	5,02	5,42	7,33	8,28	0,66	0,87
2	2,15	2,13	5,02	5,52	8,04	8,73	0,55	0,72
3	2,33	2,23	4,80	6,66	9,96	7,5	0, 5	0,85
4	2,55	2,58	6,12	6,90	10,12	6,8	0,66	0,87
5	2,61	3,02	5,96	6,16	10,17	15,4	1,20	1,57

La série nº 5 a été fortement perturbée.

A première vue, la reproductibilité n'est pas excellente. En fait, accidentellement, un facteur important a varié dans cette série : la semence. Le lot de semences préparé pour l'ensemble (orge *Rika*) et utilisé pour les deux premières séries a été gâché et remplacé à la hâte par de l'orge un peu trop ancienne et de levée irrégulière pour la série 3 (qui, cependant, a donné la variabilité la plus faible) et par un troisième lot pour les séries 4 et 5.

Or, les séries 4 et 5 vont ensemble, ainsi que 1 et 2.

Il se pourrait donc que des semences de la même variété, mais de provenances diverses aient des capacités d'extraction différentes, ce qui ne faciliterait pas les choses. La vérification directe de ce phénomène n'a été faite que pour le potassium (QUÉMÉNER et ROLLAND, 1968).

IV. — SENSIBILITÉ DE LA MÉTHODE — ABSORPTION DU PHOSPHORE DES SOLS ET DES ENGRAIS — RELATION AVEC LE POUVOIR ABSORBANT DES SOLS

Les résultats précédents ont été obtenus avec des doses d'engrais relativement élevées (P_2 = 0,06 p. 100 de P). Comme nous l'avons déjà dit, cela tient sans doute à la faible capacité d'absorption de l'orge à ce stade végétatif.

On peut se demander comment, d'un sol à l'autre, varie l'absorption en fonction de la dose apportée. Dans un essai groupant 19 sols, nous avons obtenu des résultats assez différents en fonction des doses apportées, allant de 0 à 0,8 p. 1 000 de P.

Nous avons rapproché les résultats obtenus, des déterminations du pouvoir absorbant des sols. La figure 3 montre les relations entre :

— les différences d'absorption entre les témoins (P_0) et une dose P_2 rapportées à cette dose P_2 (0,4 p. 1 000 de sol, soit 183 mg de P_2O_5) ;

— les différences de concentration après agitation de 24 heures (sol/eau = 0,25) dans l'eau (p_0) et dans une solution (p_{100} = 100 mg de P par litre) apportant au sol la même quantité de P que le traitement P_2, différence rapportée à la concentration de la solution p_{100}, soit 229 mg de P_2O_5/l — solution donc relativement concentrée. Ce rapport varie en sens inverse du pouvoir absorbant du sol.

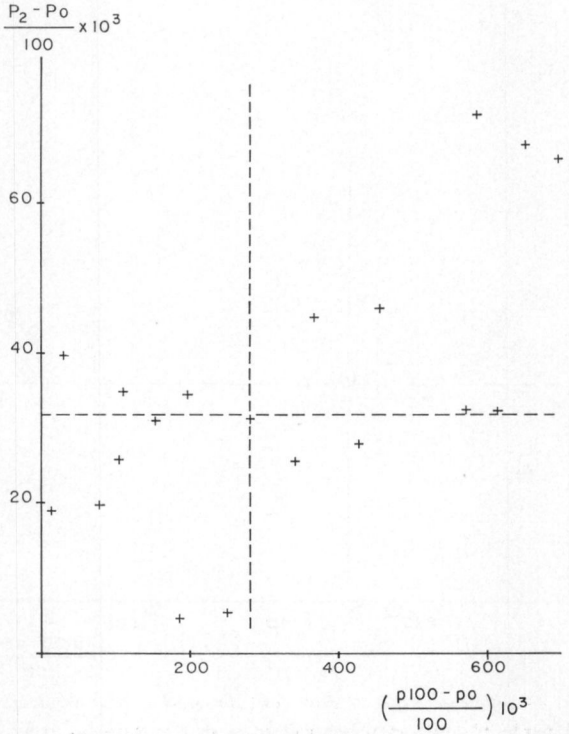


FIG. 3. — *Liaison entre l'effet d'une dose d'engrais et le pouvoir absorbant du sol*

P_0 : absorption de P par les plantules dans les Témoins sans engrais — P_2 : absorption de P en présence de 80 mg de P engrais — p_0 et p_{100} : concentrations finales après agitation du sol avec une solution renfermant 0 ou 100 mg de P/litre.

Cette figure montre une liaison assez lâche entre les deux variables, le test des médianes laissant 2 points dans les quadrants II et IV. Toutefois, on distingue quelques points nettement du groupement général : ce sont en haut à gauche, un sol humifère de Bretagne (Pleyben) ; tout à fait en bas, deux sols de craie, puis en bas à droite, un sol calcaire, et 3 sols belges, dont deux de Gembloux.

L'allure des courbes d'absorption n'étant pas forcément régulière et de petites erreurs absolues ayant une incidence assez élevée sur les rapports portés en ordonnée, un deuxième graphique destiné à contrôler le premier a été tracé (fig. 4), en utilisant non plus les différences entre P_2 et témoin, mais entre P_2 et P_1 pour le Stanford, et

entre p_{100} et p_{50}, quantités correspondantes, pour le pouvoir absorbant. Sur ce graphique, nous avons entouré les points qui paraissaient déjà aberrants sur le premier. Ce sont les deux sols de craie et les trois sols belges. Par contre, le sol humifère et le sol calcaire sont rentrés dans le groupe, tandis qu'un nouveau sol, sans caractéristiques particulières semble aberrant.

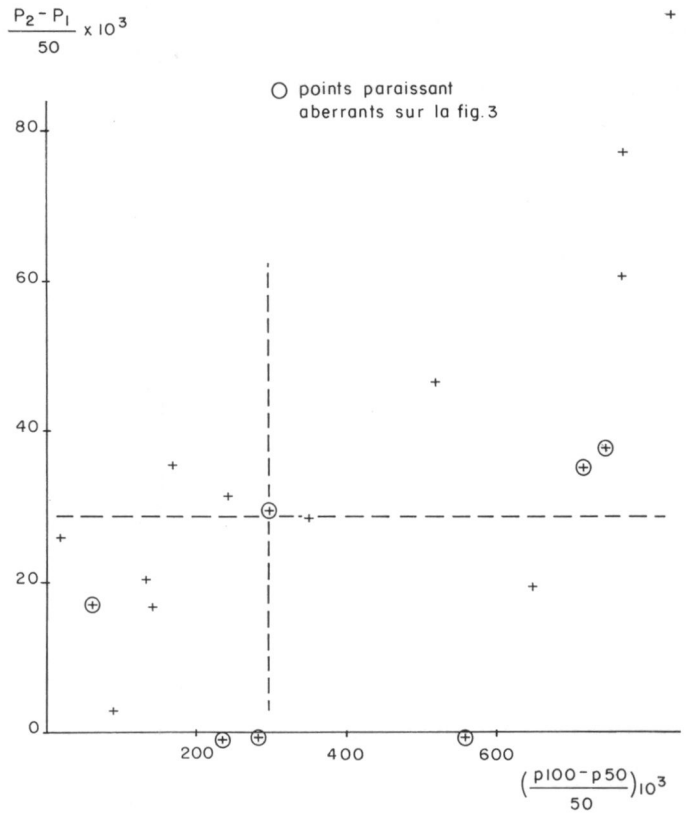


FIG. 4. — *Différence d'effet de deux doses d'engrais et pouvoir absorbant du sol*

P_1 : absorption de P par les plantules en présence de 40 mg de P engrais- p_{50} : concentration finale après agitation du sol avec une solution renfermant 50 mg de P/litre- P_2 et p_{100} comme figure 3.

On peut donc conclure que le pouvoir absorbant du sol a une nette influence sur la variation de l'absorption avec la dose, mais que la technique ne se limite pas à une simple mesure de pouvoir absorbant, puisque dans cet essai, elle permet de distinguer au moins 5 sols qui s'écartent de la relation générale. Il resterait à établir la signification de ces écarts. En particulier, il serait préférable d'utiliser pour la mesure du pouvoir absorbant une solution de même force ionique pour tous les sols (par exemple Cl_2Ca M/100) au lieu d'eau.

Quoi qu'il en soit, ces résultats n'en sont pas moins intéressants à considérer, quant à la sensibilité de la méthode, dans son utilisation pour apprécier l'assimilabilité de divers engrais.

La figure 5 est très voisine de la figure 3, mais en ordonnée, la différence d'absorp-

tion $P_2 - P_0$ a été divisée non plus par la dose P_2, mais par la limite de signification à P = 0,05. Ceci met en évidence la difficulté qu'il y a à obtenir des différences significatives, soit sur les sols à fort pouvoir absorbant, soit sur certains sols de craie, sans apporter des quantités d'engrais prohibitives ; rappelons que P_2 = 0,4 p. 1 000 de P, soit près de 1 p. 1 000 en P_2O_5. Bien que d'une manière générale, les cultures en pots se caractérisent par un rapport quantité d'engrais/quantité de terre plus élevé que les cultures en pleine terre, (pour lesquelles, il est vrai, le mélange sol/engrais reste plus hétérogène), nous atteignons ici des teneurs extrêmement élevées.

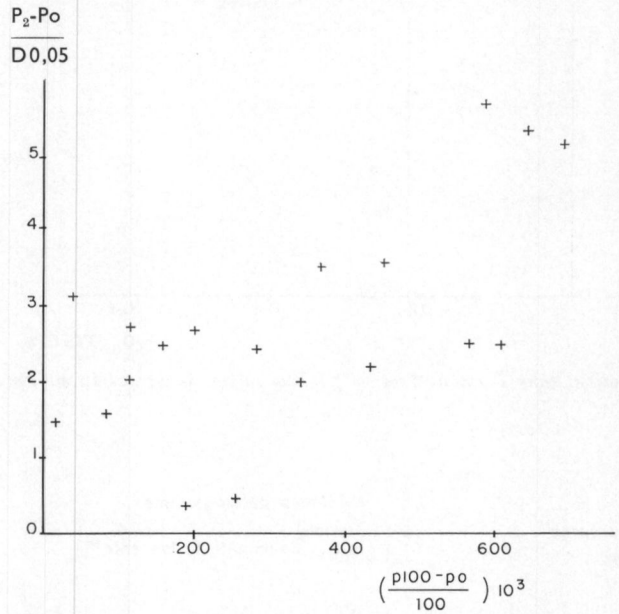


FIG. 5. — *Pouvoir absorbant du sol et sensibilité des Stanford*
Mêmes symboles que figure 3 — D 0,05 = plus petites différences significatives pour P = 0,05

Dans les comparaisons d'engrais à dose égale de P_2O_5, la sensibilité de la méthode varie par conséquent avec la nature du sol, et en particulier, diminue quand le pouvoir absorbant augmente. Des différences d'assimilabilité assez faibles ne pourront être mises en évidence que sur des sols à faible pouvoir absorbant. On peut même se demander s'il n'y a pas avantage dans certains cas à utiliser du sable comme substrat, ce que nous avons fait quelquefois.

Utilisation des témoins sans engrais (P_0) comme mesure de la fertilité naturelle du sol

Cette mesure n'a pas été, à vrai dire, une de nos préoccupations essentielles. De ce fait, nous n'avons ni assez de résultats, ni surtout de comparaisons avec des essais au champ, pour pouvoir juger de la valeur de la méthode. Nous pouvons simplement donner un complément d'information aux travaux plus importants d'autres auteurs (VIRMANI et *al*, 1966).

Pour les 19 sols dont il a déjà été fait mention, nous avons tracé les figures 6 et 7.

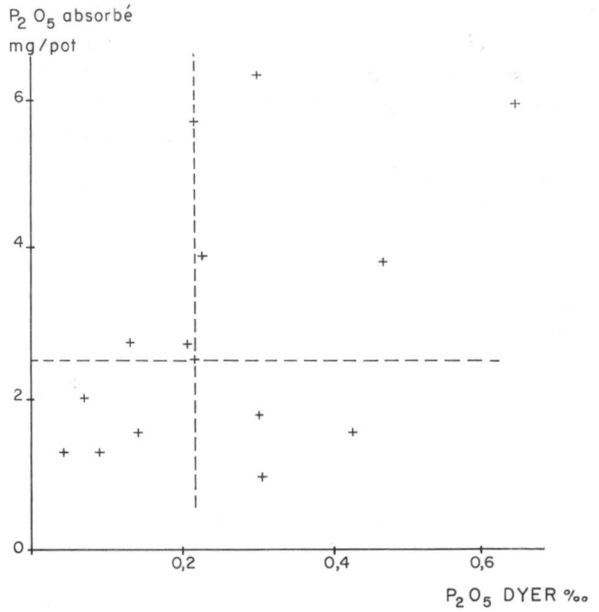


FIG. 6. — *Liaison entre P extrait d'un sol par une culture de* STANFORD *et l'extraction citrique*

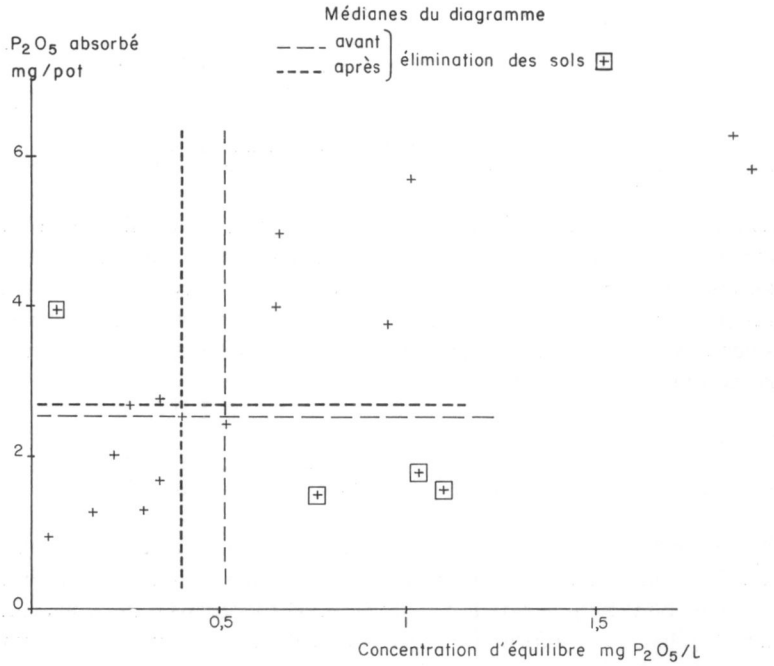


FIG. 7. — *Liaison entre l'extraction par une culture de* STANFORD *du P d'un sol et sa concentration d'équilibre*

La 1re relie les absorptions au P_2O_5 assimilable (Dyer) de ces sols (sauf 4 sols calcaires). On ne peut affirmer qu'il n'y ait aucune relation, mais 15 sols semblent un nombre insuffisant pour l'établir.

La 2e relie ces mêmes absorptions aux concentrations d'équilibre (dans l'eau au bout de 24 heures d'agitation sol/eau = 0,25). Il semble bien qu'il y ait une relation. Les médianes laissent 3 points dans le quadrant IV, ce qui est trop pour être significatif avec 19 points, mais là aussi, 3 points s'écartent beaucoup de l'ensemble. Le sol argileux de Poiseul et les 3 sols du quadrant II ont en commun la propriété d'être assez humifères. Ceci n'est pas suffisant pour expliquer cet écart, car d'autres sols humifères se placent dans le groupe principal. Ces 4 sols éliminés, les nouvelles médianes ne laissent plus qu'un point dans les quadrants pairs, ce qui est suffisant pour une probabilité de 5 p. 100 avec 15 points. Il semble d'ailleurs normal qu'en raison de la brièveté du contact sol-plante, les résultats obtenus se relient de façon plus lâche aux mesures du stock de P_2O_5 réputé assimilable (ici P_2O_5 Dyer) qu'aux mesures de l'aptitude de ce stock à passer en solution, mesures que l'on qualifie parfois, surtout dans les ouvrages anglo-saxons, de caractéristiques d'intensité (ici concentration d'équilibre).

Augmentation de la sensibilité de la méthode — Essais avec d'autres plantes

Les quantités d'engrais à apporter pour obtenir des différences significatives paraissent trop élevées pour l'orge, bien que du même ordre de grandeur que celles utilisées par STANFORD et DE MENT, pour d'autres céréales. Nous avons effectué quelques tentatives pour trouver des plantes absorbant un peu plus rapidement les phosphates.

Étant donné le grand nombre de conditions restrictives liées à ce type de microcultures, seules 3 plantes ont été comparées à l'orge : le sarrasin, qui a donné des coefficients de variation désastreux (plus de 35 p. 100), le *Ray-grass d'Italie* et le *Cresson alénois*. Pour ces dernières, les résultats de la comparaison avec l'orge sont donnés dans le tableau suivant :

	Orge		*Ray-grass*		*Cresson alénois*	
	Matière sèche *	P exporté **	Matière sèche	P exporté	Matière sèche	P exporté
Témoin sable	1 214	3,18	485	0,56	1 160	2,74
Sol d'Aspach P_0	1 267	3,48	617	1,24	1 168	2,53
Sol d'Aspach P_1 ***	1 321	4,88	760	5,15	1 204	3,60
Sol de craie (74 % CO_3Ca) P_0	1 379	3,34	607	1,11	1 249	2,58
Sol de craie (74 % CO_3Ca) P_1	1 489	6,00	794	5,52	1 210	4,78

* des parties aériennes en mg/pot
** mg de P élément par pot
*** 40 mg de P/pot du superphosphate triple en poudre.

Le déroulement des opérations était le même pour les 3 plantes. Pour l'orge, l'on sort déjà un peu, ici, des conditions d'invariance de la matière végétale produite, qui est à peu près vérifiée pour le cresson. Pour le ray-grass, les écarts sont beaucoup plus importants. Cet effet sur la matière sèche est accompagné d'une augmentation importante dé la sensibilité à P engrais, particulièrement en sol d'Aspach. La variabilité reste en faveur de l'orge (coefficients de variation pour P exporté : orge : 6,6 p. 100 — ray-grass : 11,3 p. 100 — cresson : 14,8 p. 100). Avec le ray-grass l'augmentation de la sensibilité s'accompagne donc d'une élévation de la variabilité et d'une perte de l'invariance du réactif végétal. Cette plante peut néanmoins être utilisée dans certains cas, mais il resterait à étudier avec plus de précision l'influence de la quantité de semence (ici 400 mg/pot) sur les résultats.

Mais si la sensibilité de la méthode à la quantité d'engrais (fourni sous forme dite « soluble » et pulvérulente) reste assez limitée, nous allons voir que sa sensibilité à la qualité des engrais est plus satisfaisante.

V. — TYPES DE PROBLÈMES CONCERNANT LES ENGRAIS ÉTUDIÉS PAR CETTE TECHNIQUE

La plupart de nos essais ont porté sur des comparaisons à court terme, et leurs résultats ne concernent donc que l'assimilabilité immédiate des engrais. Dans ce domaine, nous pouvons donner quelques exemples concernant :

a) *l'engrais utilisé*

Exemple I — Sol d'Aspach — 50 mg de P par pot.

	Témoin	Super triple	Bicalcique	Phosphate naturel
Exportations en mg P_2O_5 par pot :	—	—	—	—
	5,77	9,40	9,02	5,02
	D 0,05 = 1,31	CV = 11,3 %		

Le phosphate naturel ne donne pas ici de supplément d'absorption. La différence entre super (ou même monocalcique) et bicalcique est faible à ce niveau. Elle a souvent tendance à s'accroître lorsqu'on élève fortement la dose :

Exemple II — (sol de limon sableux).

	P_1 (80 mg de P/pot)	P_2 (160 mg de P/pot)	P_0
	—	—	—
Monocalcique	15,09	17,93	6,73
Bicalcique	15,73	15,82	
	D 0,05 = 1,51		

ce qui doit s'expliquer par le fait que la quantité de P en solution ne doit guère augmenter avec la dose pour le bicalcique.

Exemple III — Sol d'Aspach — P_1 = 100 mg de P_2O_5/pot
P_2 = 200 mg

	P_0 = 6,73	P_1	P_2
Super		9,18	10,34
Monopotassique		10,18	12,14
Métaphosphate		8,75	11,16
Biammonique		11,72	14,18

D 0,05 = 2,07

Il y a au moins sur ce sol une légère supériorité du phosphate d'ammoniaque.

b) *Le mode de placement de l'engrais dans le sol*

On peut apporter les engrais, soit en mélange homogène avec le sol, ce qui était le cas des exemples précédents, soit à la surface du sol, soit faire une localisation dans une couche intermédiaire : la méthode arrive à distinguer ces modes d'apport mieux que l'étroitesse du récipient n'aurait pu le laisser prévoir.

Exemple I — Sol d'Aspach — Phosphate alumino-calco-potassique (229 mg de P_2O_5/pot) — P_2O_5 exporté mg/pot

mélange	surface	couche
10,75	10,0	6,5

D 0,05 = 2,03

Exemple II — Sol d'Aspach — Engrais de mélange — Phosphate bicalcique hydraté + KCl (229 mg P_2O_5/pot) — P_2O_5 exporté en mg/pot :

mélange : 13,95 — Surface : 11,8
D 0,05 = 2,14

Exemple III — Binaire phosphate naturel + KCl — 100 mg P_2O_5/pot.
Exportations de P_2O_5 (ici pour du ray-grass)

mélange : 3,44 couche : 1,91

Étant sensible à la fois à la forme chimique de l'engrais et à son placement, la méthode sera d'un grand secours dans l'étude des techniques de conditionnement des engrais (granulation), dans lesquelles ces deux variables interviennent.

c) *Influence de l'état physique*

Exemple I — Sol de craie — 50 mg de P par pot.
Engrais à base de phosphate bicalcique :

	Type A	Type B	Type C
Poudre	8,50	8,11	9,34
Granulés < 2,3 mm	6,13	4,71	6,78
Entre 2,3 et 3,3 mm	5,59	4,73	5,62

D 0,05 = 1,30

L'effet de la granulation est particulièrement marqué pour le type B (A et C renfermaient un peu de monocalcique).

Exemple II — P_1 = 100 mg de P_2O_5/pot — P_2 = 200 mg P_2O_5/pot limon d'Aspach.

Engrais type 3 × 1 — Comparaison faite sur la base du P_2O_5 soluble/eau qui représentait 92,5 p. 100 du P_2O_5 total).

		P_1	P_2	
Engrais	granulé	9,04	11,99	
	broyé	11,49	12,82	(P_0 = 6,73)
	en solution	18,77	19,52	
D 0,05 = 2,07				

L'effet de l'apport en solution est particulièrement net dans cet essai de courte durée.

Exemple III.

L'exemple suivant montre une interaction très nette entre l'état physique, le mode d'incorporation et la nature du sol (100 mg P_2O_5/pot, même ternaire que dans l'exemple précédent).

	Sol d'Aspach (P_0 = 6,73)		Sol de craie (P_0 = 6,35)	
	mélange	surface	mélange	surface
Granulé	9,04	17,18	7,86	12,14
Broyé	11,49	16,16	12,13	13,63
Dissous	18,77	18,82	15,60	16,09
D 0,05 = 2,07				

L'apport en surface diminue l'effet de l'état physique, mais de façon beaucoup moins marquée dans le sol de craie.

La méthode permet donc de faire intervenir, avec beaucoup de facilité, deux des variables intervenant dans l'effet du conditionnement : l'état physique, et essentiellement la dimension des particules. Elle semble, comme les autres techniques de cultures en pots, laisser de côté un facteur important, en particulier pour la granulation des engrais peu solubles, la faculté de délitement des granules au contact d'un sol humide, et l'éparpillement de leurs débris par le travail ultérieur du sol. Ce facteur qui, au champ, à plus ou moins long terme a un effet de sens inverse de celui de l'augmentation de la granulométrie, ne peut être introduit dans des cultures en pots que de façon extrêmement artificielle.

Nous avons cependant essayé de le faire intervenir en opérant de la façon suivante : l'engrais granulé est localisé en couche, dans le sol humide (1/2 saturation) pendant quelques jours, au bout desquels le mélange sol-engrais est agité pendant 5 minutes dans un flacon en matière plastique assez souple, puis replacé dans le pot et placé immédiatement sous les racines. Les résultats obtenus (granulé « mûri ») sont comparés à ceux donnés par le même engrais granulé, ou réduit en poudre, agité dans le même sol beaucoup plus sec, sans subir l'influence préalable de l'humidité du sol (granulé « non-mûri »). Voici les résultats obtenus avec deux granulés (2 mm

à 3,15 mm) de binaires à base de phosphate naturel et de KCl (100 mg P_2O_5 par pot, essai avec ray-grass).

	Engrais A	Engrais B
Poudre	3,83	3,26
Granulé :		
« non mûri »	1,55	1,69
« mûri »	3,02	2,11
D 0,05 = 0,45	P_0 = 1.45	

Bien que très artificielle, la méthode permet de mettre en évidence la plus grande facilité de délitement du granulé A.

(Notons au passage que le P_2O_5 de ces binaires paraît plus facilement assimilable que celui du phosphate naturel (exemple 1 du paragraphe *a*), ce qui, au moins en partie, est à imputer à l'action favorable du mélange intime avec KCl.)

CONCLUSIONS

Dans l'étude des problèmes de fertilisation phosphatée, la technique de STANFORD et DE MENT paraît surtout sensible aux facteurs qualitatifs liés à la technologie des engrais : forme chimique, état physique (liquide ou solide, et pour ces derniers, différences de granulométrie), placement des engrais et, moyennant une adaptation forcément assez artificielle, aptitude au délitement des granules.

Dans ce domaine, elle paraît utile pour faire le tri rapide d'échantillons d'engrais de fabrications diverses, expérimentales ou non, et préparer ainsi l'expérimentation définitive en conditions plus naturelles et, en particulier, au champ. Ce tri est souvent rendu nécessaire dans l'expérimentation agronomique liée à la technologie, par le nombre parfois élevé de variantes d'une fabrication expérimentale. Pour cet objectif très limité, cette méthode biologique tient sans doute mieux compte du grand nombre de facteurs influençant l'alimentation phosphatée des plantes dans le sol, que des tests purement chimiques.

Mais, la courte durée de la culture, en liaison avec la vitesse relativement faible d'absorption des phosphates par les plantes, est sans doute responsable du fait que la dose de P_2O_5 nécessaire pour obtenir une différence significative avec le témoin, paraît très élevée par rapport à ce qu'on applique dans la pratique, bien qu'elle varie avec la nature du sol et en particulier, avec son pouvoir absorbant. Cette caractéristique incite à faire preuve d'une grande prudence dans son utilisation (en particulier pour l'appréciation de la fertilité naturelle des sols) et à la limiter dans le domaine des engrais à celle de méthode de tri rapide dont les résultats doivent être confirmés par l'expérimentation en conditions naturelles.

Reçu pour publication en août 1968.

SUMMARY

EXAMPLES OF APPLYING THE STANFORD-DE-MENT'S METHOD TO PROBLEMS OF PHOSPHATIC FERTILIZATION

The effect of various qualitative factors, brought out by fertilizer technology can be rapidly shown by the use of the STANFORD and DE MENT technique. Because of its limitations in the quantitative field, arising likely from the brevity of this method, the results need to be confirmed by a conventional experimentation in the natural environment.

ZUSAMMENFASSUNG

ANWENDUNGSBEISPIELE DER STANFORD-DE-MENT METHODE IN PROBLEMEN DER PHOSPHORSAUREN DÜNGUNG

Die Wirkung von verschiedenen qualitativen Faktoren, die von der Düngertechnologie abhängen, kann durch Anwendung der STANFORD und DE MENT Methode rasch nachgewiesen werden. Die ungenügende Fähigkeit dieser Methode die quantitativen Effekte zu offenbaren, welche wahrscheinlich auf ihre kurze Dauer zurückzuführen ist, erfordert eine Bestätigung der Ergebnisse durch eine übliche in natürlichem Milieu durchgeführte Untersuchung.

РЕЗЮМЕ

Примеры применения метода Станфорда — Де Мена к проблемам фосфорного удобрения.

Ж. КЕМЕНЭ.

Применение метода Станфорда — Де Мена в области фосфорного удобрения помогает очень быстро выявить эффекты различных факторов качественного характера, зависящих от технических приемов внесения удобрений. Недостаточность метода в смысле количественном, вызванная по всей вероятности его непродолжительностью, делает необходимым подтверждение результатов при помощи классических экспериментов в природной среде.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

QUÉMÉNER J., ROLLAND D., 1968. Application de la technique de STANFORD et De MENT modifiée à l'extraction du potassium assimilable des sols (en préparation).

ROLLAND D., 1962. Essais d'application de la technique STANFORD et de MENT à la détermination de la potasse assimilable des sols, réalisés à la Station agronomique d'Aspach-le-Bas. *Mémoire de 3e année de l'Inst. tech. Pratique agric.*, Paris.

STANFORD, DE MENT, 1957. A method for measuring short-term absorption by plants. I. Phosphorus. *Soil Sci. Soc., Amer.*, **21**, 612-617.

VIRMANI S. M., MOULINIER H., MASOYER R., 1966. Contribution à l'étude de méthodes de dosage de l'acide phosphorique assimilable des sols. *Ann. agron.*, **17**, 143-155.

RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 27, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles séparées seront utilisées pour les références bibliographiques, les tableaux, les légendes des figures et graphiques, etc.

Au début de chaque mémoire, on indiquera : — *le titre du mémoire :* il ne devra pas comporter d'abréviation ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs*, précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de... ; — *le nom de l'établissement*, dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

Les mémoires seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :
a) *sommaire :* résumé suffisamment précis pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction* dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé*, en donnant sous une forme concise, tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats* à présenter de la manière la plus brève possible ; e) *discussion et conclusion* ; f) *résumé* destiné à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour les collaborations, les fonds, les dons... ; h) *références bibliographiques*.

Les travaux originaux en anglais doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français très *complet*. Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

Pour les autres documents (notes, mises au point, revues, rapports, etc.) l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

Les références bibliographiques doivent être citées dans le texte de la manière suivante : DUPONT et DUVAL (1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de *et al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

Pour les articles : le (s) nom (s) de (s) auteur (s) suivi (s) des initiales du (des) prénom (s) ; la date de parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatres langues mentionnées) : le titre du périodique en abrégé, selon la World List of Scientific Periodicals, ou le Bulletin Signalétique du C. N. R. S. ; le volume ; la première et la dernière page de l'article.

Pour les ouvrages : le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés. et, si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera en plus le nom de l'auteur du chapitre cité, le nom des rédacteurs principaux, précédé de la mention « in », le titre de l'ouvrage.

La mention de « communications personnelles » ou « données non publiées » etc. doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d' « Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies, doivent être fournis à part. Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérotations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponibles est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit.

Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur feuille séparée, et porter les numéros des figures.

Les graphiques, schémas, cartes, dessins d'appareils seront envoyés *à l'état de projets*, leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5, *soit* × 0,25.

Il est rappelé que le format utile des Annales est : 16 × 24 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

Photographies : Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos 9 × 12, 4 photos 9 × 5,5, 6 photos 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible après clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur feuilles séparées et porter les numéros des figures.

Correction des épreuves : les auteurs recevront une épreuve à corriger.

Envoi du manuscrit : M. HÉNIN, Centre national de Recherches agronomiques, 78 - Versailles, France. On demande deux exemplaires.

Le Directeur de la publication : M. L. CAGNAC

Imprimerie Bussière à Saint-Amand (Cher), France. — 12-1968.

Dépôt légal : 4e trimestre 1968. N° d'impression : 2925.

ANNALES
AGRONOMIQUES

VOLUME 19 1968 NUMÉRO 6

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE
149 rue de Grenelle, PARIS-7e

Ann. agron., 1968, **19** (6), 611-629.

DONNÉES VARIÉTALES SUR L'ÉVOLUTION DE LA COMPOSITION DU POIS

PREMIÈRE PARTIE

G. LEFÈVRE, G. HIROUX

Station d'Agronomie,
23, rue Debray, 80 - Amiens
Institut national de la Recherche agronomique

SOMMAIRE

Étude des variations relevées dans les jours encadrant la date de récolte théorique de cinq variétés, de la production totale et de sa répartition par calibres, de la composition du pois caractérisée par ses teneurs en matières sèches, insoluble alcool, sucres et azote. Comparaison de la signification de ces valeurs avec celles fournies par la séparation par calibrage.

INTRODUCTION

De nombreux travaux ont été consacrés à l'étude de la composition du grain de pois et à son évolution. Ils ont déjà fait l'objet de plusieurs mises au point (LENNART-OTTOSON, 1958 ; ANTHISTLE, 1961). On dispose ainsi de données permettant de mieux connaître la variabilité de cette matière première utilisée par les industries de la conservation.

Actuellement, l'industrie française juge le produit brut en le répartissant en classes obtenues par un calibrage normalisé. Cette étude a pour objet, dans sa première partie, d'étudier si cette séparation peut effectivement correspondre, soit pour une variété donnée, soit pour un ensemble de variétés, à des différences significatives dans la composition du pois. Les nombreuses analyses réalisées dans ce but seront utilisées dans une deuxième partie (1) pour rechercher les corrélations pouvant exister entre les variations des divers composants étudiés, afin de voir si l'une d'elles ne pourrait rendre compte de la composition de l'ensemble.

(1) Avec la collaboration de M. ARNOUX (Biométrie) et M. COUSIN (Amélioration des Plantes).

Enfin, ces données devraient être à rapprocher du comportement, soit technologique, soit gustatif des variétés individuelles.

MATÉRIEL D'ÉTUDE

Le matériel a été recueilli grâce à la collaboration du C. E. T. A. de Crèvecœur qui, après accord de la Fédération des C. E. T. A. de l'Oise, a mis à notre disposition un certain nombre de champs d'essais de variétés de pois, a assuré la collecte des échantillons et leur transport à la Station. (Nous tenons à remercier tout spécialement l'Ingénieur de ce C. E. T. A., M. MEYER, et son collaborateur, M. RENARD, ainsi que M. SAVARY, Directeur de la Fédération des C. E. T. A. de l'Oise, pour leur concours particulièrement apprécié.)

Cinq variétés ont été étudiées : *Annonay, Chemin long hâtif, Supcovert, Trois gousses* et *Cent pour un.*

Leurs caractéristiques générales, fournies par M. COUSIN, sont les suivantes :

Nom de la variété	Forme du grain sec	Couleur du grain sec	Poids approximatif de 1 000 grains (g)	Précocité
Nain très hâtif d'Annonay	lisse	jaune	290	précoce
Chemin long hâtif	—	—	240	1/2 précoce
Supcovert	—	vert	190	—
Clamart trois gousses	—	jaune	190	1/2 tardif
Serpette nain Cent pour Un	—	—	170	tardif

Cinquante pieds ont été prélevés quotidiennement dans chaque parcelle, pendant une période de 10 jours encadrant la date de réception présumée idéale.

Il n'y a pas eu de répétitions pour chaque prélèvement mais la valeur de chaque échantillon peut en quelque sorte être testée par le sens des variations relevées au cours des dix jours de prélèvement.

Il est nécessaire de préciser ici que cette étude n'a pas envisagé la variabilité que l'on pourrait observer, pour une même variété, entre divers champs ayant des conditions de milieu différentes (climat, sol, richesse, fumure, etc.). Cet aspect de la question n'est pas sous-estimé et pourrait représenter un autre stade de cette étude qui, sous cet angle, pourrait être considérée comme préalable à une recherche sur l'influence des facteurs culturaux.

Les échantillons cueillis entiers tous les matins, à la même heure, nous parvenaient toujours dans le même délai, bref. Il n'y a donc pas eu de préfanage, dont l'influence sur la valeur des déterminations pourrait également faire l'objet d'une étude spéciale.

Le but de notre travail a été seulement de comparer la composition du pois, des divers calibres et de variétés différentes, recueillies dans un secteur expérimental, restreint, soumis à des conditions de milieu et de récolte identiques qui, en fait, n'interviennent pas dans la discussion des résultats.

DÉTERMINATIONS EFFECTUÉES

Après avoir étudié antérieurement (LEFÈVRE et HIROUX, 1965) les variations relatives du poids des pieds, des gousses et des grains, nous nous sommes limités ici aux grains sur lesquels nous avons fait les mesures suivantes :

— Pesée de la récolte totale des grains correspondant au « rendement » brut ;

— Répartition en calibres : cette répartition a, pour les pois, une importance considérable étant donné qu'un prix différentiel est attribué à chaque calibre :

inférieur à 7,5 mm	(Extra-fin)
compris entre 7,5 et 8,2 mm	(Très fin)
compris entre 8,2 et 8,75 mm	(Fin)
supérieur à 8,75 mm	(Moyen)

— Détermination de la matière sèche.

La teneur en eau avait paru, dans une publication antérieure (LEFÈVRE et HIROUX, 1965), être une donnée particulièrement importante, pouvant éventuellement servir à caractériser l'ensemble de la composition du pois (étuve à 75°C puis à 100°C jusqu'à poids constant).

— Séparation des matières insolubles dans l'alcool à 80°GL (MIA) suivant les normes de l'A. O. A. C.

Cette méthode est employée pour rendre compte, d'une façon plus simple que celle obtenue avec un dosage direct, de la richesse en amidon.

— Détermination des sucres totaux dans la partie soluble.

La teneur en sucres des pois pourrait être une caractéristique variétale.

— N total sur les grains frais.

L'azote total permet de chiffrer globalement la teneur approximative en protéines ou en polypeptides, autres composants quantitativement importants de la graine de pois.

La même détermination faite sur l'insoluble, permet, par différence, de donner une valeur encore plus approchée de la teneur en amidon.

Les résultats des déterminations analytiques ont été reportés sur des figures et un tableau permettant de suivre l'évolution des éléments dosés et de noter leurs valeurs extrêmes.

Cela réduira au minimum l'exposé des remarques que ces résultats doivent mettre en évidence.

A. — *Étude par variété de l'évolution de la production totale, de sa répartition par calibres et de la composition de chacun d'eux*

« ANNONAY » (fig. 1).

• Neuf prélèvements échelonnés du 23 juin au 5 juillet.

• Poids maximum de la récolte : 372 g pour 50 pieds, obtenu au 8e prélèvement, après une augmentation assez régulière (fig. 1 *a*).

• Évolution du poids individuel de chaque calibre (fig. 1 *b*) :

— le poids du calibre le plus fin diminue continuellement ;

— les calibres intermédiaires présentent une certaine stabilité au cours des jours médians à la période de prélèvement ;

— le calibre le plus grossier augmente très rapidement après le 6e prélèvement.

• $\frac{\text{Matière sèche}}{\text{Matière fraîche}} \times 100$ (fig. 1 *c*) :

— assez bonne stabilité, pour chacun des calibres, de la valeur de ce rapport, sauf en ce qui concerne les pois les plus gros (supérieurs à 8,75 mm) ;

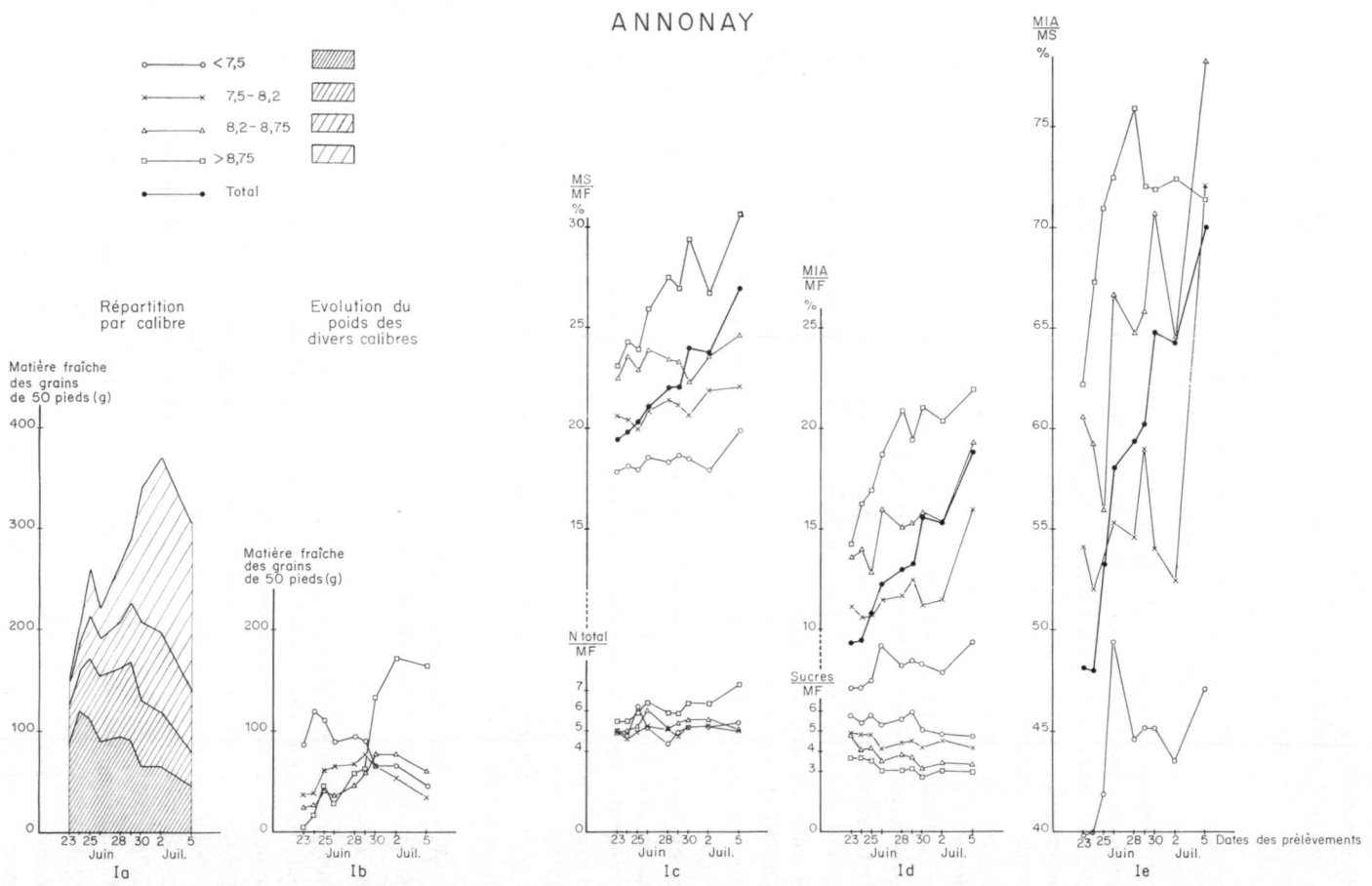


FIG. 1. — *Évolution, en fonction du temps, de l'importance relative de divers éléments intervenant dans l'évaluation de la production.* Variété *Annonay*

1*a*. — *Évolution de la production pondérale totale et de sa répartition en calibres* (en g pour 50 pieds) 1*b*. — *Évolution individuelle du poids de chaque calibre* (en g pour 50 pieds) 1*c*. — *Évolution, par calibre, des teneurs en matière sèche* (courbes supérieures) *et de l'azote total* (courbes inférieures), *exprimées en p. 100 de la matière fraîche* 1*d*. — *Évolution, par calibre, des teneurs en matières insolubles à l'alcool* (courbes supérieures) *et des sucres totaux* (courbes inférieures), *exprimées en p. 100 de la matière fraîche* 1*e*. — *Évolution, par calibre, des teneurs en matières insolubles à l'alcool, exprimées en p. 100 de la matière sèche.*

— assez bonne séparation des calibres (fig. 6 *b*) ;

— extrêmes relevés au cours de la période d'observation :

	Pour les calibres	Pour l'échantillon moyen
Minimum	17,9	19,4
Maximum	30,7	27,0

• $\frac{\text{Matières insolubles dans l'alcool}}{\text{Matière fraîche}} \times 100$ (fig. 1 *d*) :

— ce rapport, pour la fraction $\varnothing < 7{,}5$, est assez stable et bien différencié des autres, restant compris entre 7,1 et 9,4 p. 100 ;

— pour la fraction $7{,}5 < \varnothing < 8{,}2$, en excluant le résultat du dernier prélèvement, il reste compris entre 10,6 et 12,5 p. 100, également bien séparé des autres calibres ;

— les calibres plus grossiers ont des compositions se chevauchant entre dates différentes de prélèvement ;

— les valeurs extrêmes relevées au cours de la période d'observation ont été :

	Pour les calibres	Pour l'échantillon moyen
Minimum	7,1	9,35
Maximum	22,0	18,9

• $\frac{\text{Sucres}}{\text{Matière fraîche}} \times 100$ (fig. 1 *d*) :

Pour une date de récolte donnée, les teneurs en sucres sont bien différenciées entre calibres :

Minimum observé : 2,7
Maximum observé : 5,9

• $\frac{\text{Matières insolubles dans l'alcool}}{\text{Matière sèche}} \times 100$ (fig. 1 *e*) :

Pour ce rapport, seuls les pois les plus fins présentent des valeurs inférieures à 50 p. 100, bien séparées de celles des autres calibres.

« CHEMIN LONG HATIF » (fig. 2).

• Dix prélèvements échelonnés du 25 juin au 6 juillet.

• Poids maximum de la récolte : 455 g de grains pour 50 pieds, obtenu au 8e prélèvement, après une augmentation irrégulière démarrant après le 5e prélèvement (fig. 2 *a*).

• Évolution du poids individuel de chaque calibre (fig. 2 *b*) :

— le poids du calibre le plus fin diminue d'une façon continue ;

— les poids des calibres intermédiaires augmentent, passent par un maximum, puis décroissent ;

— après le 7e prélèvement, la proportion des pois les plus gros devient importante.

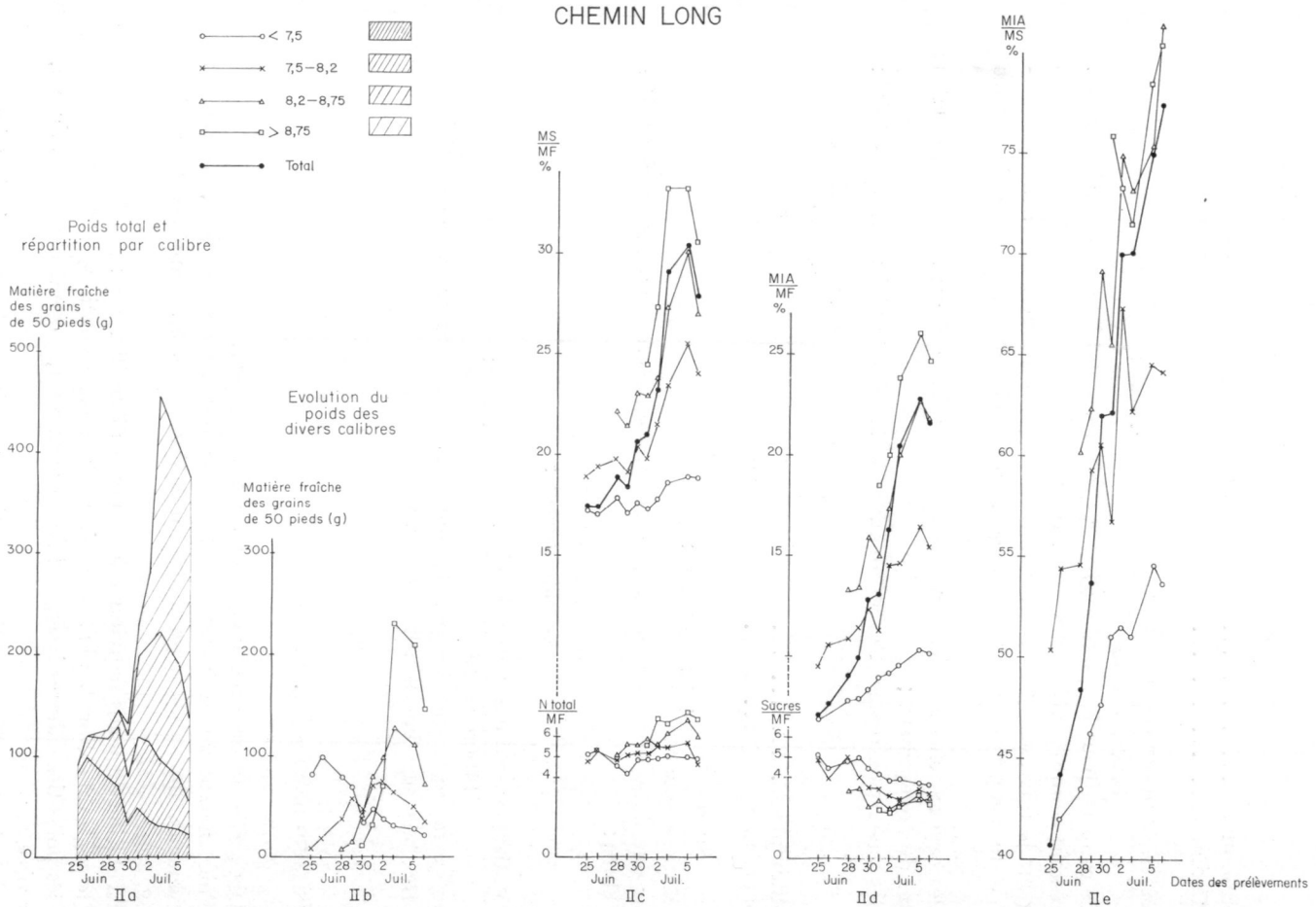


FIG. 2. — *Évolution, en fonction du temps, de l'importance relative de divers éléments intervenant dans l'évaluation de la production.* Variété *Chemin Long Hatif*

2a. — Évolution de la production pondérale totale et de sa répartition en calibres (en g pour 50 pieds) *2b. — Évolution individuelle du poids de chaque calibre* (en g pour 50 pieds) *2c. — Évolution, par calibre, des teneurs en matière sèche* (courbes supérieures) *et de l'azote total* (courbes inférieures), *exprimées en p. 100 de la matière fraîche* *2d. — Évolution, par calibre, des teneurs en matières insolubles à l'alcool* (courbes supérieures) *et des sucres totaux* (courbes inférieures), *exprimées en p. 100 de la matière fraîche* *2e. — Évolution, par calibre, des teneurs en matières insolubles à l'alcool, exprimées en p. 100 de la matière sèche.*

• $\frac{\text{Matière sèche}}{\text{Matière fraîche}} \times 100$ (fig. 2 *c*) :

— la valeur de ce rapport, comprise entre 17,1 et 18,9, différencie bien le calibre le plus fin ;

— les autres calibres ont des valeurs pouvant largement se chevaucher dans le temps quand les prélèvements sont poursuivis ;

— extrêmes relevés :

Minimum : 17,1
Maximum : 33,3

— l'échantillon moyen présente une augmentation rapide de sa teneur en matière sèche, passant de 17,4 à 30,4.

• $\frac{\text{Matières insolubles dans l'alcool}}{\text{Matière fraîche}} \times 100$ (fig. 2 *d*) :

— pour le calibre $\varnothing < 7{,}5$ mm, ce rapport augmente très régulièrement au cours du temps, de 6,9 à 10,3 ;

— comme pour la matière sèche, les autres calibres ont des valeurs de ce rapport pouvant largement se chevaucher :

entre 13 et 16 pour les 2e et 3e calibres ;
entre 18 et 22 pour les 3e et 4e calibres.

— extrêmes :

	Pour les calibres	Pour l'échantillon moyen
Minimum	6,9	7,09
Maximum	26,1	22,8

• $\frac{\text{Sucres}}{\text{Matière fraîche}} \times 100$ (fig. 2 *d*) :

les teneurs sont assez bien différenciées entre calibres d'une même date, bien qu'il puisse y avoir des chevauchements entre échantillons de dates différentes :

Minimum observé : 2,36
Maximum observé : 5,2

• $\frac{\text{Matières insolubles dans l'alcool}}{\text{Matière sèche}} \times 100$:

le calibre le plus fin a un rapport Matières insolubles à l'alcool/Matière sèche restant inférieur à 55 p. 100.

SUPCOVERT » (fig. 3).

• Six prélèvements — *seulement* — compris entre le 9 juillet et le 15 juillet.

• Poids maximum de la récolte : 475 g de grains pour 50 pieds, obtenu au dernier prélèvement, suivant une courbe croissante, assez régulière (fig. 3 *a*).

• Évolution du poids individuel de chaque calibre (fig. 3 *b*) :

— maintien du poids du calibre le plus fin à travers une variabilité assez grande ;

— croissance continue du poids des autres calibres.

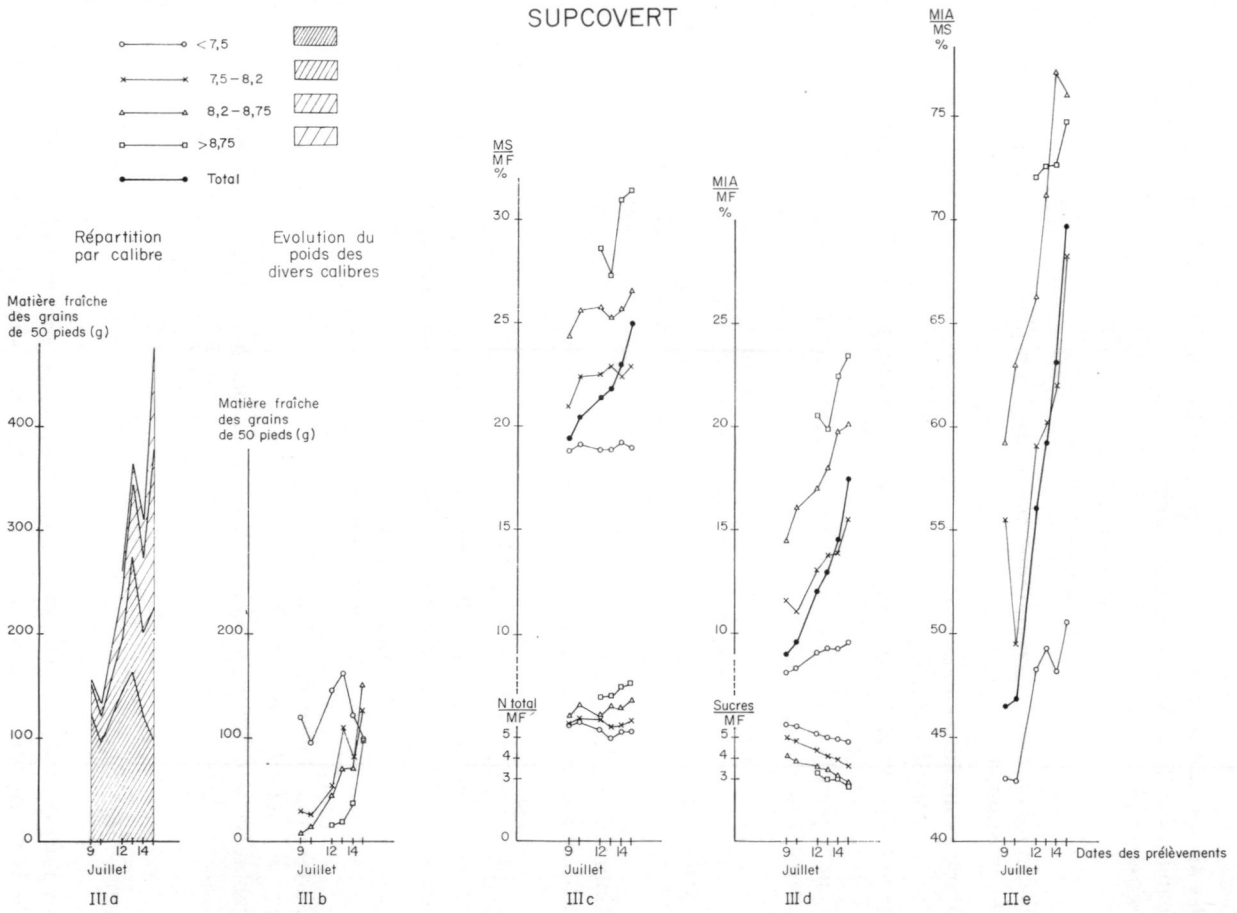


FIG. 3. — *Évolution, en fonction du temps, de l'importance relative de divers éléments intervenant dans l'évaluation de la production.* Variété *Supcovert*

3 *a*. — *Évolution de la production pondérale totale et de sa répartition en calibres* (en g pour 50 pieds) 3 *b*. — *Évolution individuelle du poids de chaque calibre* (en g pour 50 pieds) 3 *c*. — *Évolution, par calibre, des teneurs en matière sèche* (courbes supérieures) *et de l'azote total* (courbes inférieures), *exprimées en p. 100 de la matière fraîche* 3 *d*. — *Évolution, par calibre, des teneurs en matières insolubles à l'alcool* (courbes supérieures) *et des sucres totaux* (courbes inférieures), *exprimées en p. 100 de la matière fraîche* 3 *e*. — *Évolution, par calibre, des teneurs en matières insolubles à l'alcool, exprimées en p. 100 de la matière sèche.*

• $\frac{\text{Matière sèche}}{\text{Matière fraîche}} \times 100$ (fig. 3 *c*) :

— pour ces déterminations, en nombre moins important que pour les autres variétés, le rapport de la matière sèche à la matière verte est très différencié par les calibres (fig. 6 *b*) ;

— extrêmes relevés :

	Pour les calibres	Pour l'échantillon moyen
Minimum	18,8	19,5
Maximum	31,4	25,0

• $\frac{\text{Matières insolubles dans l'alcool}}{\text{Matière fraîche}} \times 100$ (fig. 3 *d*) :

— en faisant la même remarque que précédemment sur le nombre de prélèvements, on relève peu de chevauchements entre calibres (fig. 7 *b*) ;

— extrêmes :

	Pour les calibres	Pour l'échantillon moyen
Minimum	8,1	9,05
Maximum	23,5	17,5

• $\frac{\text{Sucres}}{\text{Matière fraîche}} \times 100$ (fig. 3 *d*) :

les teneurs en sucres sont bien différenciées par calibre pour chaque prélèvement. Elles diminuent très régulièrement au cours du temps :

Minimum observé : 2,65
Maximum observé : 5,64

• $\frac{\text{Matières insolubles dans l'alcool}}{\text{Matière sèche}} \times 100$:

le calibre le plus fin a un rapport Matières insolubles dans l'alcool/Matières sèches restant inférieur à 51 p. 100.

« TROIS GOUSSES » (fig. 4).

• Onze prélèvements compris entre le 9 et le 21 juillet.

• Poids maximum de la récolte : 482 g de grains pour 50 pieds, obtenu au 9e prélèvement, augmentation régulière de poids jusqu'à cette date (fig. 4 *a*).

• Évolution du poids individuel de chaque calibre (fig. 4 *b*) :

— le calibre le plus fin diminue de poids très régulièrement à partir du 3e prélèvement ;

— les autres calibres augmentent de poids assez régulièrement de jour en jour. Seul le calibre 7,5-8,2 passe par un maximum.

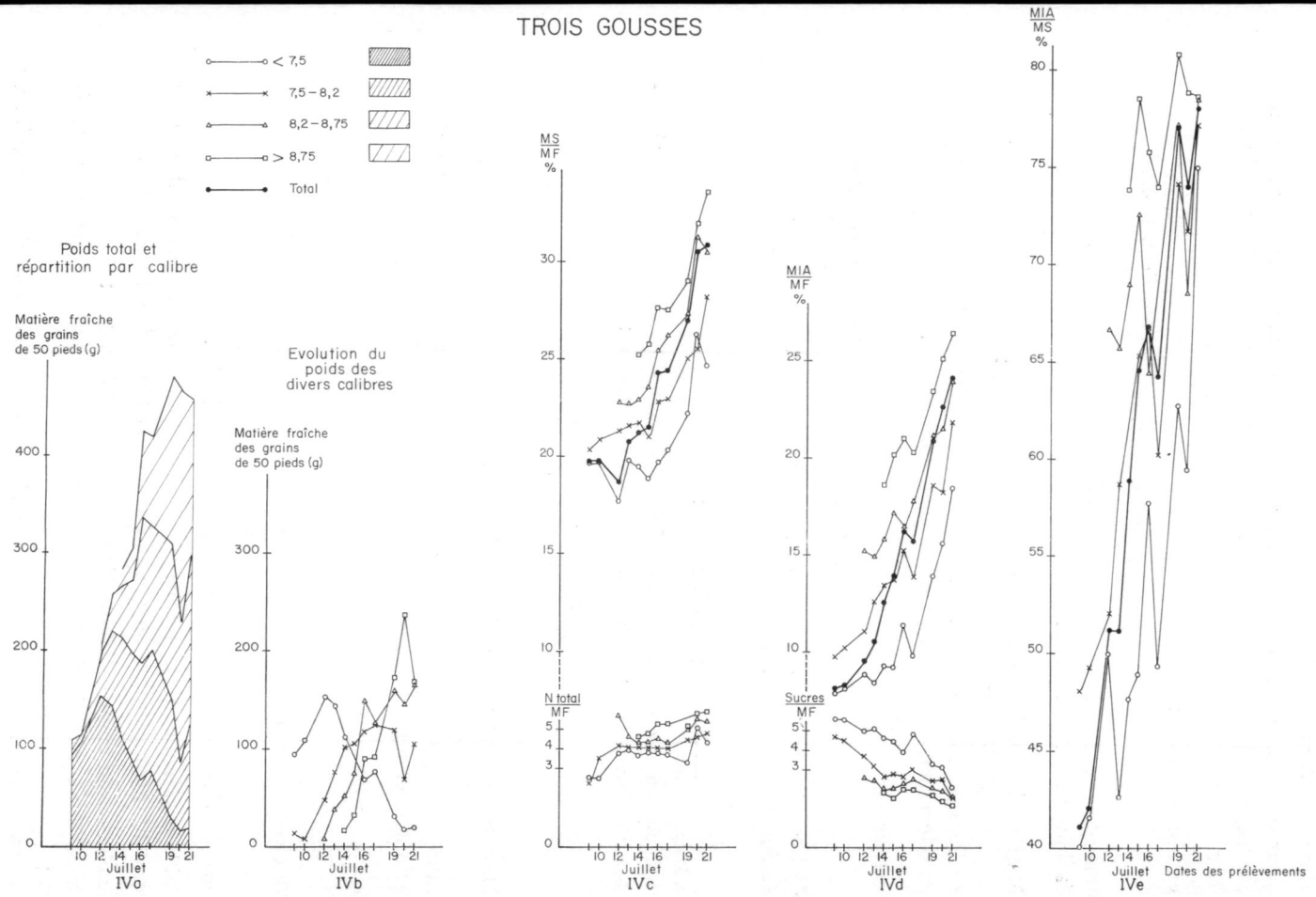


FIG. 4. — *Évolution, en fonction du temps, de l'importance relative de divers éléments intervenant dans l'évaluation de la production.*
Variété *Trois gousses*

4 *a*. — *Évolution de la production pondérale totale et de sa répartition en calibres* (en g pour 50 pieds) 4 *b*. — *Évolution individuelle du poids de chaque calibre* (en g pour 50 pieds) 4 *c*. — *Évolution, par calibre, des teneurs en matière sèche* (courbes supérieures) *et de l'azote total* (courbes inférieures), *exprimées en p. 100 de la matière fraîche* 4 *d*. — *Évolution, par calibre, des teneurs en matières insolubles à l'alcool*(courbes supérieures) *et des sucres totaux* (courbes inférieures), *exprimées en p. 100 de la matière fraîche* FIG. 4 *e*. — *Évolution, par calibre, des teneurs en matières insolubles à l'alcool, exprimées en p. 100 de la matière sèche.*

• $\frac{\text{Matière sèche}}{\text{Matière fraîche}} \times 100$ (fig. 4 *c*) :

— augmentation très importante de ce rapport pour tous les calibres prélevés au-delà du 8e prélèvement.

Les teneurs en matière sèche — de toutes les dates de prélèvement mélangées — *ne différencient alors pas du tout les calibres.*

— extrêmes relevés :

	Pour les calibres	Pour l'échantillon moyen
Minimum	17,7	18,7
Maximum	33,6	30,9

• $\frac{\text{Matières insolubles dans l'alcool}}{\text{Matière fraîche}} \times 100$ (fig. 4 *d*) :

— comme pour Matière sèche/Matière fraîche, les teneurs en insoluble alcool de la matière verte des divers calibres se chevauchent très largement ;

— extrêmes relevés :

	Pour les calibres	Pour l'échantillon moyen
Minimum	7,9	8,1
Maximum	26,4	24,1

• $\frac{\text{Sucres}}{\text{Matière fraîche}} \times 100$:

à l'intérieur de chaque prélèvement, la teneur en sucres différencie bien les divers calibres mais cette teneur diminuant très régulièrement pour chacun d'eux, il y a recouvrement entre calibres :

Minimum observé : 2,25
Maximum observé : 6,6

• $\frac{\text{Matières insolubles dans l'alcool}}{\text{Matière sèche}} \times 100$:

pour ces nombreux prélèvements, le rapport Matières insolubles à l'alcool/Matière sèche peut atteindre 75 p. 100 pour le calibre le plus fin.

« CENT POUR UN » (fig. 5).

• Onze prélèvements du 26 juillet au 6 août.

• Poids maximum de la récolte : 548 g de grains pour 50 pieds, obtenu au dernier prélèvement suivant une courbe assez irrégulière (fig. 5 *a*).

• Évolution du poids individuel de chaque calibre (fig. 5 *b*) :

— très bonne tenue à un niveau élevé du calibre le plus fin.

— augmentation régulière du calibre suivant ;

— faible quantité de 8,2-8,75 et très peu de > 8,75.

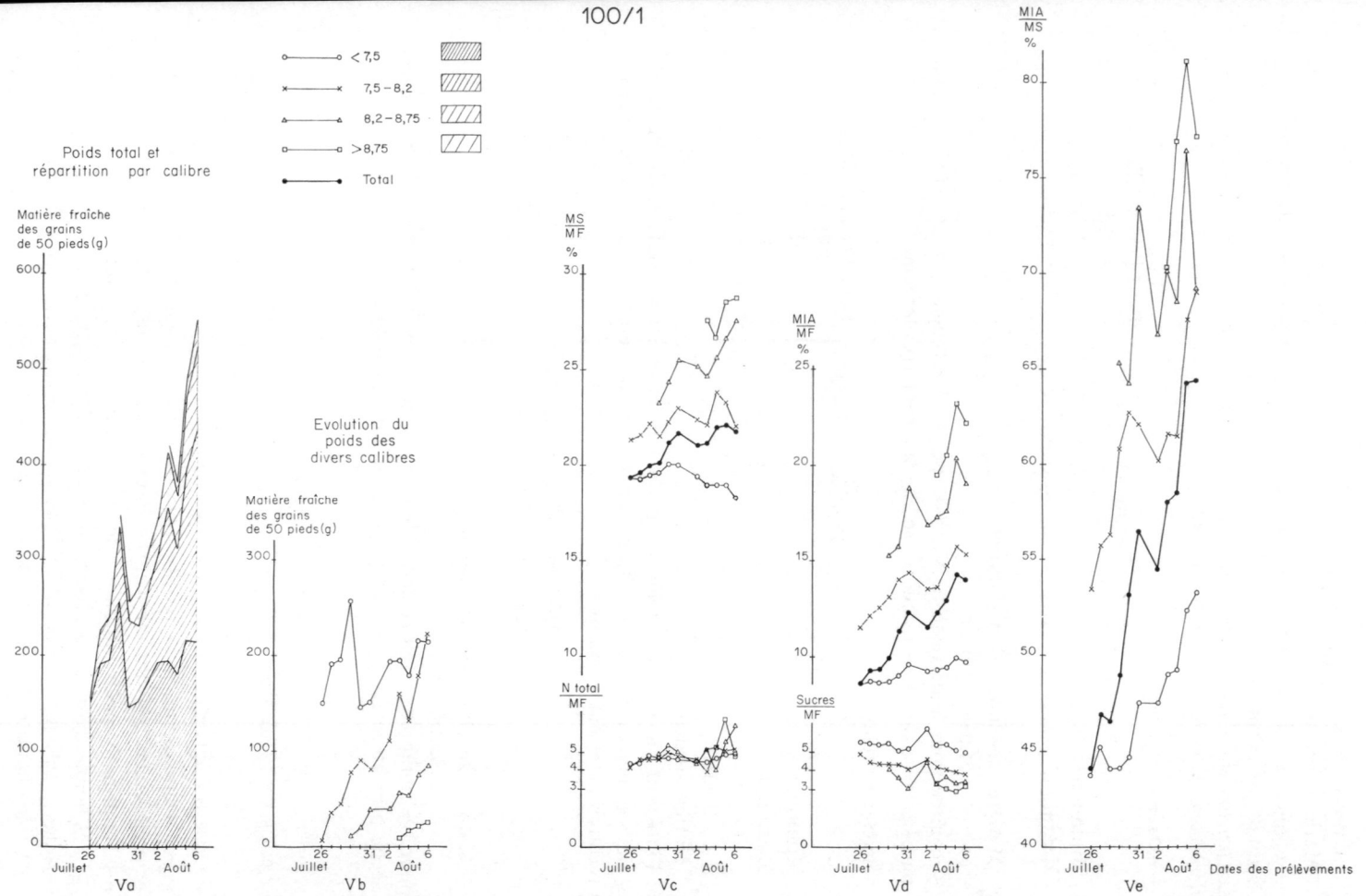


FIG. 5. — *Évolution, en fonction du temps, de l'importance relative de divers éléments intervenant dans l'évaluation de la production*
Variété *Cent pour un*

5 *a*. — *Évolution de la production pondérale totale et de sa répartition en calibres* (en g pour 50 pieds) 5 *b*. — *Évolution individuelle du poids de chaque calibre* (en g pour 50 pieds) 5 *c*. — *Évolution, par calibre, des teneurs en matière sèche* (courbes supérieures) *et de l'azote total* (courbes inférieures), *exprimées en p.* **100** *de la matière fraîche* 5 *d*. — *Évolution, par calibre, des teneurs en matières insolubles à l'alcool* (courbes supérieures) *et des sucres totaux* (courbes inférieures), *exprimées en p.* **100** *de la matière fraîche* 5 *e*. — *Évolution, par calibre, des teneurs en matières insolubles à l'alcool, exprimées en p.* **100** *de la matière sèche.*

• $\frac{\text{Matière sèche}}{\text{Matière fraîche}} \times 100$ (fig. 5 *c*) :

— très bonne séparation des calibres (fig. 6 *b*) pour une date donnée ;

— à noter même une tendance vers la baisse de la teneur en matière sèche des pois du calibre le plus fin pour les derniers prélèvements :

	Pour les calibres	Pour l'échantillon moyen
Minimum	18,3	19,3
Maximum	28,3	22,1

La matière sèche de l'échantillon moyen augmente relativement très peu.

• $\frac{\text{Matières insolubles dans l'alcool}}{\text{Matière fraîche}} \times 100$ (fig. 5 *d*) :

mêmes remarques que pour la teneur en matière sèche :

— très bonne séparation des calibres (fig. 7 *b*) ;

— extrêmes :

	Pour les calibres	Pour l'échantillon moyen
Minimum	8,4	8,5
Maximum	23,2	14,2

A noter la valeur faible du Maximum de l'échantillon moyen.

• $\frac{\text{Sucres}}{\text{Matière fraîche}} \times 100$:

assez bonne séparation des calibres :

Minimum observé : 2,9
Maximum observé : 6,2

• $\frac{\text{Matières insolubles dans l'alcool}}{\text{Matière sèche}} \times 100$:

bonne séparation du calibre le plus fin dont la teneur en insoluble alcool de la matière sèche atteint 53 p. 100.

B. — *Comparaison des variétés : valeurs extrêmes relevées dans la production totale ou répartie par calibre et dans les déterminations réalisées sur chacun des calibres*

a) *Poids total et répartition par calibre* (tabl. 1).

Le tableau 1 donne, par variété, le poids total et le poids de chaque calibre lorsqu'on a relevé, au cours des observations, un maximum pour l'un d'eux.

La juxtaposition de ces données, pour les cinq variétés, fait ressortir les différences des rendements maximum de cinquante pieds. Le plus tardif (*Cent pour Un*) est le plus productif.

D'autre part, lorsque la production totale a atteint son maximum, on note :

— une baisse importante du poids du calibre le plus fin, accompagnée d'une augmentation très prononcée des calibres les plus gros, dans le cas de :

Trois Gousses Chemin long Annonay,

— seulement une baisse du calibre le plus fin pour *Supcovert.*

b) *Teneur en matière sèche exprimée en p. 100 de la matière verte.*

Les amplitudes maximum de variation, limitée par les valeurs extrêmes, de la teneur en matière sèche, sont comparées à l'aide de deux représentations graphiques plaçant :

- pour chaque calibre, les variétés côte à côte (fig. 6 *a*),
- pour chaque variété, les calibres côte à côte (fig. 6 *b*).

TABLEAU I

Poids total et poids de chaque calibre lorsqu'un maximum est obtenu pour l'un d'eux
(en g pour 50 pieds)

Variété	< 7,5	7,5-8,2	8,2-8,75	> 8,75	Total	N° du prélèvement	Nombre de prélèvements
	65	54	*79*	*174*	*372*	8	9
Annonay	*119*	39	27	17	202	2	du 23-6
	91	*78*	59	63	291	6	au 5-7
	32	64	*128*	*231*	*455*	8	10
Chemin long ...	*99*	20	—	—	119	2	du 25-6
	39	*76*	97	70	282	7	au 6-7
	98	*127*	*150*	*100*	*475*	6	6
Supcovert	*164*	111	70	19	364	4	du 9-7 au 16-7
	81	119	160	172	*482*	9	11
	183	48	7	—	208	3	du 12-7
Trois gousses ..	79	*123*	126	93	421	8	au 23-1
	20	105	*127*	167	459	11	
	18	68	145	*237*	468	10	
	215	*223*	*85*	*25*	*548*	11	11
Cent pour Un ..							du 26-7
	257	77	12	—	346	4	au 6-8

On peut ainsi observer (fig. 6 *b*) :

— une très bonne séparation des valeurs de cette teneur en matière sèche du calibre le plus fin ($\varnothing < 7,5$) — avec une exception pour la variété *Trois Gousses* — ;

— une distinction entre les autres calibres :

- excellente chez *Supcovert* et très bonne chez *Cent pour Un,*
- assez bonne chez *Annonay* (excellente pour les trois premiers calibres),
- très mauvaise chez *Chemin long* et *Trois Gousses.*

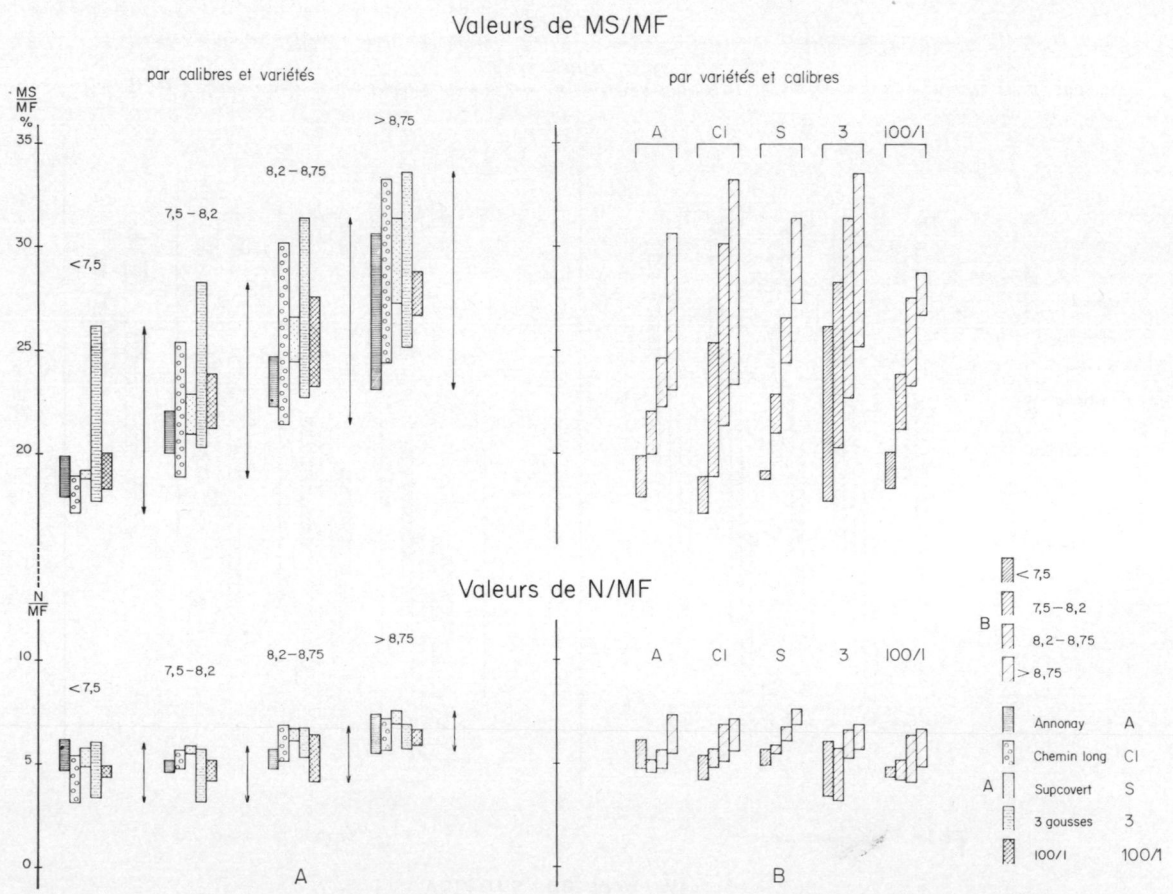


FIG. 6. — *Valeurs extrêmes des teneurs en matière sèche et en azote total, exprimées en p.* **100** *de la matière fraîche*
6 A. — *Extrêmes, pour un calibre donné, des diverses variétés* 6 B. — *Extrêmes, pour une variété donnée, des divers calibres*

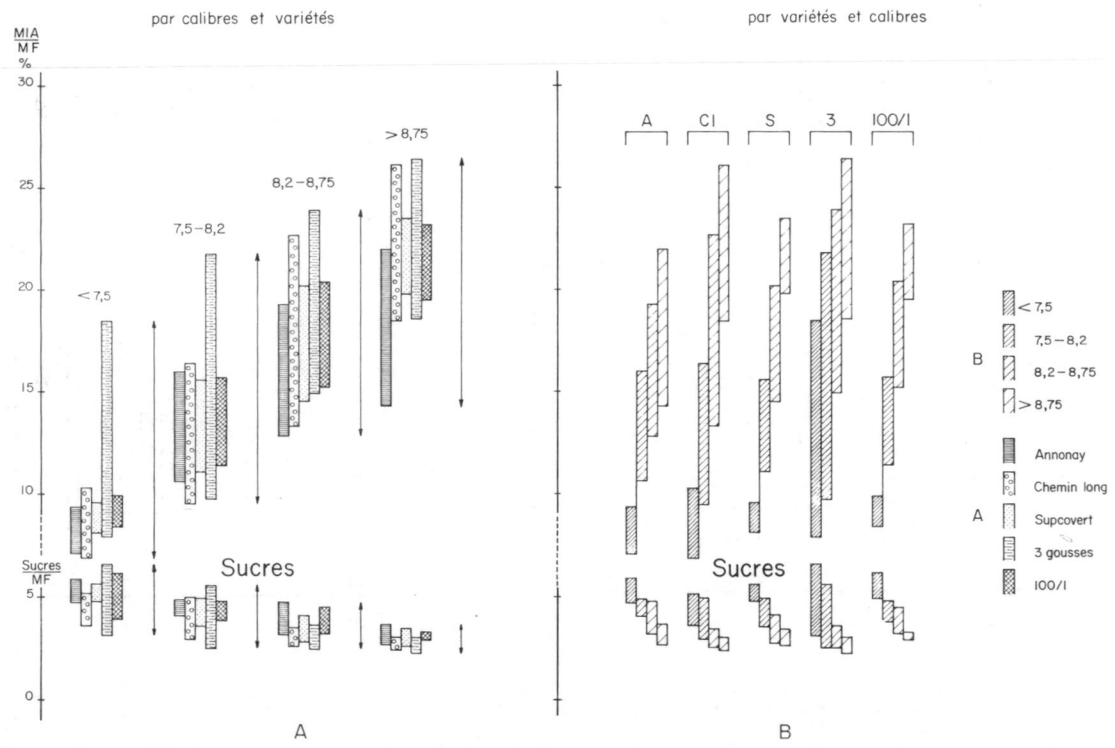


FIG. 7. — *Valeurs extrêmes des teneurs en matières insolubles à l'alcool et en sucres totaux, exprimées en p.* **100** *de la matière fraîche*

7 A. — *Extrêmes, pour un calibre donné, des diverses variétés* 7 B. — *Extrêmes, pour une variété donnée, des divers calibres*

— en éliminant les valeurs par trop extrêmes et paraissant anormales dans la variété *Trois Gousses* (fig. 6 *a*), il semble que les caractéristiques moyennes des teneurs en matière sèche, rapportées à la Matière fraîche seraient les suivantes pour les divers calibres :

Calibres	Teneurs en matière sèche
$\varnothing < 7{,}5$	< 20 %
$7{,}5 < \varnothing < 8{,}2$	20 — 25
$8{,}2 < \varnothing < 8{,}75$	22 — 30
$\varnothing > 8{,}75$	> 24

Les limites inférieures varient de 2 en 2, les limites supérieures de 5 en 5.

c) *Teneur en azote total exprimée en p. 100 de la Matière fraîche.*

Au bas des figures 6, les teneurs en azote sont représentées de la même façon que les teneurs en matière sèche.

Il semblerait ressortir que les valeurs minimum augmentent quand le calibre augmente. Cela peut n'être dû qu'à un accroissement correspondant de la teneur en matière sèche et sera discuté par ailleurs.

d) *Matière insoluble à l'alcool/Matière fraîche* × *100 (fig. 7).*

Les figures représentant la gamme des variations du rapport Matière insoluble à l'alcool/Matière fraîche ont été conçues de la même façon que celles de Matière sèche/Matière fraîche et conduisent à peu près aux mêmes conclusions.

La détermination des teneurs moyennes représentatives des calibres donne des valeurs qui paraissent mieux différenciées :

Calibres	Teneurs moyennes en Matière insoluble à l'alcool/Matière fraîche
$\varnothing < 7{,}5$	< 10 %
$7{,}5 > \varnothing < 8{,}2$	10 — 16,5
$8{,}2 < \varnothing < 8{,}75$	14 — 23
$\varnothing > 8{,}75$	> 18

e) *Sucres/Matière fraîche* × *100.*

Les teneurs en sucres montrent — normalement — une nette tendance à la diminution de leurs valeurs maximum quand la grosseur du calibre augmente.

L'amplitude des variations des valeurs de ce rapport semble, surtout avec le calibre le plus fin, être susceptible de caractériser une variété.

CONCLUSIONS

Cet ensemble de résultats montre que la séparation par calibrage ne correspond pas toujours à des différences significatives dans la composition du pois, telle que nous l'avons définie.

En particulier, des valeurs extrêmes — qui peuvent désavantager certaines variétés — indiquent bien que les pois des calibres les plus fins peuvent en vieillissant, tout en restant petits, acquérir une teneur en insoluble très importante.

Par contre, en restant dans certaines limites de durées de prélèvement — limites qui ne peuvent être vérifiées que par l'analyse elle-même — on peut observer des teneurs en divers composants qui, en se maintenant dans des intervalles distincts, pourraient préciser la valeur du calibrage.

On obtiendrait ainsi une différenciation accrue que l'on doit encore confronter à d'autres critères destinés, soit à simplifier le contrôle (objet de la deuxième partie de ce mémoire), soit à rendre compte d'autres qualités recherchées dans le pois, telles que sa tendreté. Ce dernier point fera l'objet principal de nos observations futures.

Reçu pour publication en août 1968.

SUMMARY

VARIETAL DATA ON THE DEVELOPMENT OF THE PEA'S COMPOSITION.
FIRST PART

Study of the variations, noted within the scope of the expected harvesting dates of five varieties of the total production and the graded distribution thereof, of the pea composition typified by its content of dry matter, insoluble alcohol, sugar and nitrogen. Comparison of the significance of these values with that educed from separative grading.

ZUSAMMENFASSUNG

ANGABEN ÜBER DIE EVOLUTION DER ZUSAMMENSETZUNG
BEI VERSCHIEDENER ERBSENSORTEN.
ERSTE TEIL

Untersuchung der Veränderungen, die in den Tagen um die theoretische Erntezeit bei fünf Erbsensorte auftreten, des gesamten Ertrags und der Verteilung nach Grössen, der Zusammensetzung der Erbse, wie sie durch den Gehalt an Trockenmasse, an unlöslichen Alkohol, an Zuckern und Stickstoff charakterisiert wird. Vergleich der Bedeutung dieser Werte mit derjenigen die durch Sortierung ermittelt wurde.

РЕЗЮМЕ

Сортовые данные эволюции состава гороха.

Г. ЛЕФЭВР, Г. ХИРУ.

Авторы изучили изменения отмеченные в дни окаймляющие теоритический период сбора урожая пяти сортов гороха, общей продукции и ее распределения по калибрам, состава гороха по содержанию в нем сухого вещества, нерастворимого спирта, сахаров и азота. В данной работе проводится кроме того сравнение значения этих показателей с показателем доставленным калибровочным разделением.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANTHISTLE M. S., 1961. The composition of peas in relation to texture. The fruit and vegetable canning and quick freezing research association scientif. *Bull.* n° 4, Chipping Campden Gloucestershire.

LEFÈVRE G., HIROUX G., 1965. Contribution à l'étude sur pied de la maturation de deux variétés de pois de conserve. *Ann. agron.*, **16** (4), p. 449-463.

LENNART OTTOSON, 1958. *Growth and maturity of peas for canning and freezing*, Uppsala.

Ann. agron., 1968, **19** (6), 631-652.

PASSAGE A L'ÉTAT NON ÉCHANGEABLE DES IONS POTASSIUM ET LITHIUM.

ÉTUDE DU PHÉNOMÈNE A L'AIDE DES COURBES DE DÉSORPTION PAR LA CHALEUR DE L'ION AMMONIUM

R. CHAMINADE (1)

avec la collaboration technique d'Anne-Marie TABAREAU

Station centrale d'Agronomie,
Centre national de Recherches agronomiques, 78 - Versailles
Institut national de la Recherche agronomique

SOMMAIRE

La technique d'étude de la désorption en fonction de la température des ions ammonium fixés par les argiles a été utilisée pour l'étude de la rétrogradation des ions potassium et lithium.

Les montmorillonites ont été saturées d'ammonium après la rétrogradation de ces deux cations et on a étudié la modification de l'allure de la courbe de désorption consécutive à la rétrogradation des cations. Cette modification apporte des informations sur la relation existant entre la position des ions K et Li et leur possibilité de passage à l'état échangeable.

INTRODUCTION

Dans une publication antérieure (CHAMINADE, 1965) une technique d'étude de la désorption par la chaleur de l'ion NH_4 fixé par les argiles a été décrite. Son principe consiste à établir en fonction de la température la courbe du dégagement d'ammoniac, dans des argiles renfermant NH_4^+.

Lorsqu'une argile NH_4 est traitée par la chaleur, la libération de NH_3 se fait en deux temps : en premier lieu NH_4 adsorbé subit une décomposition thermique suivant la réaction $NH_4^+ \rightarrow NH_3 + H^+$. NH_3 gazeux diffuse alors dans la phase solide et est entraîné par le courant d'azote.

(1) Nous remercions vivement M. CHAUSSIDON de l'aide qu'il a apportée dans l'interprétation des faits expérimentaux.

L'acidité provoquée par la libération des protons peut avoir deux conséquences : la rétention des ions NH_4 restants et une aluminisation superficielle avec formation éventuelle d'hydroxydes d'aluminium dont les propriétés d'échangeurs d'ions se modifient lors de la déshydroxylation.

Ce mémoire est une contribution à l'étude des phénomènes de rétrogradation des ions K et Li par l'utilisation de la technique précédente.

LE PASSAGE A L'ÉTAT NON ÉCHANGEABLE

Ce phénomène a été décrit pour la première fois pour l'ion potassium. Une mise au point de la question a été publiée par SCHUFFELEN et VAN DER MAREL (1955). L'ion ammonium présente un phénomène analogue (CHAMINADE, 1940).

Plus récemment on a montré que l'ion Li était également susceptible, par un mécanisme différent, de passer à l'état non échangeable après chauffage de montmorillonite Li à différentes températures (HOFMANN et KLEMEN, 1950 ; GLAESER et MERING, 1967).

Technique.

La technique utilisée pour l'établissement des courbes de désorption de l'ion NH_4 est celle décrite dans le mémoire précédent (CHAMINADE, 1965). La seule modification apportée est la vitesse de montée en température qui a été portée à 250° par heure. Une courbe de désorption peut être ainsi obtenue en un peu plus de deux heures ce qui permet un gain de temps très appréciable par rapport aux conditions précédentes. L'expérience montre que les résultats sont très voisins.

Définitions et conventions.

La courbe de désorption de l'ion ammonium en fonction de la température dans une montmorillonite NH_4 présente une forme caractéristique en double S avec un point d'inflexion à 400°. On peut admettre que la « position » des ions NH_4 est définie par leur courbe de désorption. Une telle définition comporte une part de convention qui sera adoptée dans la suite de l'exposé.

La « position » des ions NH_4 se définit directement d'après la courbe de désorption.

En ce qui concerne les autres cations, leur position se définira par celle qu'occupent les ions NH_4, après échange avec ces cations.

Par exemple, il est possible de situer les ions K dans une argile NH_4-K, par comparaison entre la courbe de désorption d'une argile saturée de NH_4 et celle de l'argile NH_4-K. Les « positions » des ions K seront celles non occupées par l'ion NH_4 dans l'argile NH_4-K.

De même, si l'on considère une argile K à laquelle on fait subir un traitement provoquant le passage d'une partie des ions K à l'état non échangeable, il est possible de définir la position des ions K rétrogradés, en déplaçant par NH_4 les ions K restés échangeables et en établissant la courbe de désorption des ions NH_4 fixés.

La comparaison de cette courbe avec celle d'une argile NH_4 saturée, ne renfermant pas d'ions rétrogradés permettra de situer les positions occupées par K rétrogradé.

Le terme « position » adopté ici ne correspond pas à l'idée simple qu'on pourrait se faire de positions topographiques réelles (surfaces externes, internes, latérales).

Par contre, on peut envisager des positions locales ; par exemple : 2 cavités hexagonales chargées, situées côte à côte ou une cavité chargée alternant avec une cavité non chargée etc...

C'est la résultante « statistique » du comportement de ces positions particulières que traduit la courbe de désorption.

Résultats expérimentaux.

Les recherches exposées ci-après ont été réalisées sur une montmorillonite de Camp-Berteaux dont la fraction $< 2\ \mu$ a été extraite par la technique habituelle : traitement au carbonate de sodium, lavage, dispersion et sédimentation.

Montmorillonite K saturée.

Dix échantillons de montmorillonite ont été traités par une solution de ClK, N neutre jusqu'à saturation en potassium.

Le dosage du potassium échangeable par déplacement à l'acétate d'ammonium normal a donné 112,2 me pour 100 g de montmorillonite (moyenne des 10 répétitions : écart maximum $\pm$ 2 p. 100).

Les échantillons ont été soumis à 10 alternances d'humidification et de dessiccation à 80°, à raison d'une dessiccation par 24 heures.

Après ce traitement, la montmorillonite ne renfermait plus que 76,14 me de K échangeable (moyenne de 10 dosages : chiffres extrêmes 75 et 77,9).

La rétrogradation avait donc porté sur 112,2-76,14 = 36,06 meq. K pour 100 g d'argile.

Les courbes de désorption de l'ammonium ont été établies sur les échantillons saturés d'ions NH_4 avant et après rétrogradation du potassium.

Dans chaque série de dix, on obtenait une très bonne superposition des courbes de désorption.

A titre d'exemple les quantités désorbées à 400° étaient les suivantes (me pour 100 g) :

	Moyenne
Échantillons initiaux :	
40,5-41,5-40,5-40,5-39,5-39,5-40,5-40,5-39,5-41,5	40,4
Échantillons après rétrogradation de K :	
39,5-38-37,5-37,5-35,5-39,5-38 9-37,5-37,5-35,536-36,5-36-37-35	36,8

Les moyennes des quantités désorbées à différentes températures ont été les suivantes :

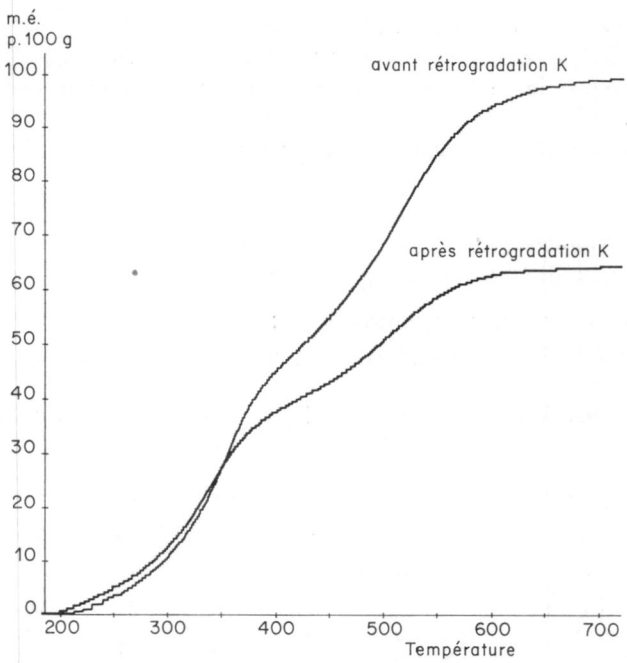
	300°	350°	450°	450°	500°	550°	600°	Max.
Avant rétrogradation (1)..	8,9	23,9	40,4	50,2	64,1	80,1	88,9	96,4
Après rétrogradation (2) ..	11,7	25,1	36,8	43	50,8	59,3	64	66,8
2/1 × 100	100	100	91	85,5	79	73,5	71,5	69

Jusqu'à la température de 350°, les quantités d'ammonium désorbées ne sont pas diminuées par la rétrogradation du potassium. Entre 350 et 400°, les deux courbes commencent à diverger et les quantités d'ammonium désorbées, après rétrogradation du potassium sont notablement plus faibles. La différence maximum atteint 29,6 me pour 100 g de montmorillonite. Ces résultats montrent que le phénomène de rétrogradation est largement influencé par la « position » des ions potassium, celle-ci était définie suivant la convention précédente, par la température de désorption des ions NH_4 après échange avec les ions K.

Si l'on évalue la quantité de potassium rétrogradé, par la diminution de la quantité d'ammonium fixé, on obtient les chiffres suivants :

	Avant rétrogradation	Après rétrogradation	K rétrogradé	K rétr. % de K échangeable
Jusqu'à 350°	23,9	25,1	0	0
350° à 400°	16,5	11,7	4,8	29
400° à 450°	9,8	6,2	3,6	36,6
450° à 500°	13,9	7,8	6,1	43,7
500° à 550°	16,0	8,5	7,5	46,7
550° à 600°	8,8	4,7	4,1	46,5
600°	7,5	2,8	4,7	63,5

Les courbes 1 représentent, sur un même graphique la désorption de l'ammonium dans une montmorillonite saturée initialement de potassium et ensuite d'ammonium.



Courbes 1.

Pour la courbe supérieure, la saturation en NH_4 a été faite avant rétrogradation du potassium et pour la courbe inférieure, après 10 dessiccations à 80°.

On voit nettement que jusqu'à 350°, la rétrogradation du potassium ne diminue pas la quantité d'ammonium désorbé. Il se manifeste même une tendance, faible mais très régulièrement reproductible, à une augmentation de cette quantité. Par contre, au-dessus de 350°, les deux courbes divergent nettement.

Il est à noter que, dans les évaluations précédentes, on a supposé que la quantité de potassium rétrogradé était équivalente à la diminution de l'ammonium fixé. En fait, lorsqu'on déplace le potassium échangeable par une solution normale d'acétate d'ammonium neutre, il existe une différence entre la quantité de potassium déplacé et la quantité d'ammonium fixé. On peut attribuer cette différence à l'intervention des ions H^+ de la solution dans le phénomène d'échange.

Dans l'essai précédent, ce phénomène se manifeste de la façon suivante :

	K déplacé (dosage direct)	NH_4
Avant rétrogradation de K.	112,2	96,4
Après rétrogradation	76,1	66,8
K rétrogradé	36,1	29,6

Cette constatation ne modifie en rien les conclusions relatives à la relation entre la position des ions K et la rétrogradation.

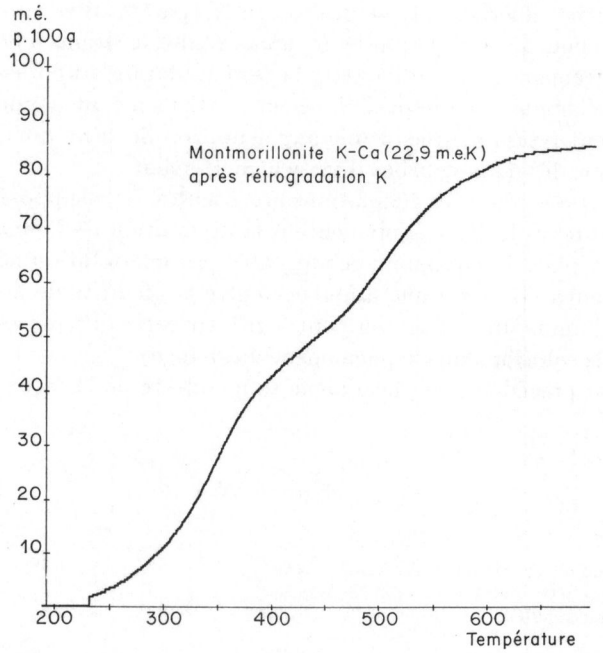
Montmorillonites K-Ca.

Les montmorillonites K-Ca ont été préparées à partir de montmorillonite Ca traitée par des solutions de KCl de concentrations variables.

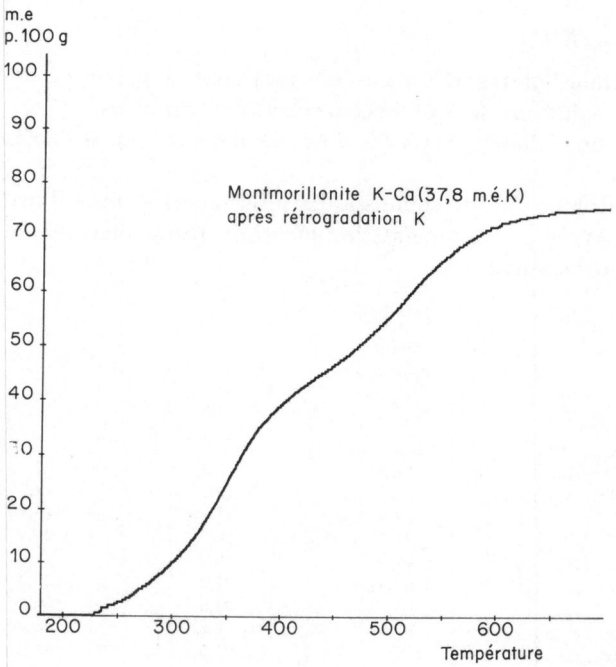
Le potassium échangeable a été dosé par déplacement à l'acétate d'ammonium normal, neutre.

Les échantillons ont été soumis à dix alternances d'humidification et de dessiccation à 80°. Après ce traitement, le potassium resté échangeable a été dosé. Les résultats ont été les suivants :

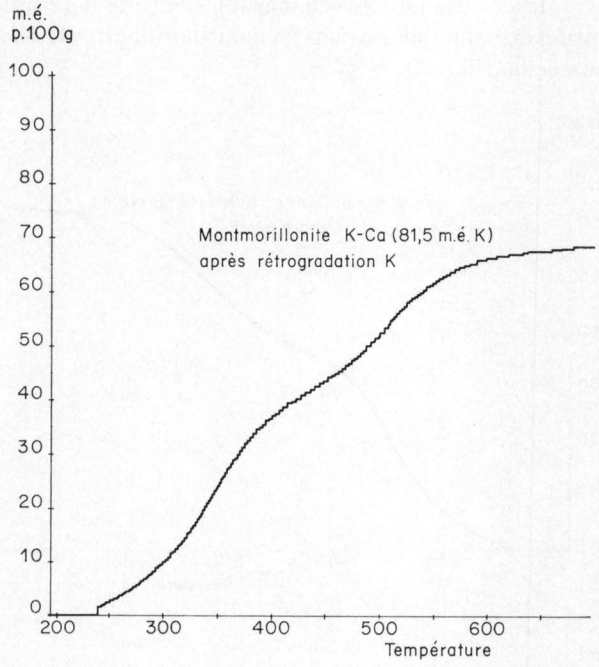
	Avant rétrogradation	Après rétrogradation	K rétrogradé
1	traces		
2	14,2	7,2	7
3	22,9	10,2	12,7
4	27,8	12	15,8
5	37,8	15,7	22,1
6	41	19,2	21,8
7	53,9	24,7	29,2
8	72	36,5	35,5
9	81,5	46,2	35,3
10	112	67,5	44,5



Courbe 2.



Courbe 3.



Courbe 4.

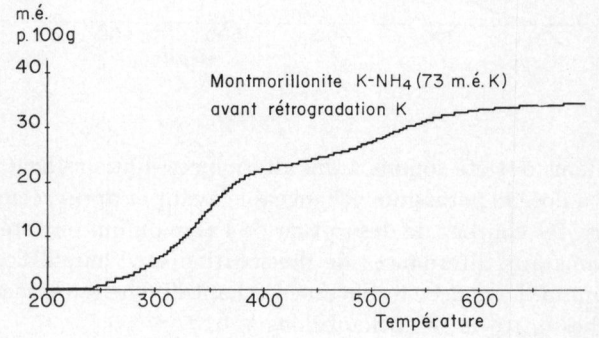
Les courbes de désorption de l'ammonium ont été établies sur les échantillons saturés de ce cation avant et après rétrogradation.

Les « positions » du potassium rétrogradé ont été déterminées, comme précédemment, par comparaison des deux courbes. La quantité de potassium rétrogradé a été évaluée par la diminution des quantités d'ammonium fixé.

Les courbes 2, 3, 4 établies pour les échantillons 3, 5, 9 après rétrogradation du potassium et saturation en ammonium, montrent que la diminution de la quantité d'ammonium fixé se produit pour des positions désorbables à des températures supérieures à 350°.

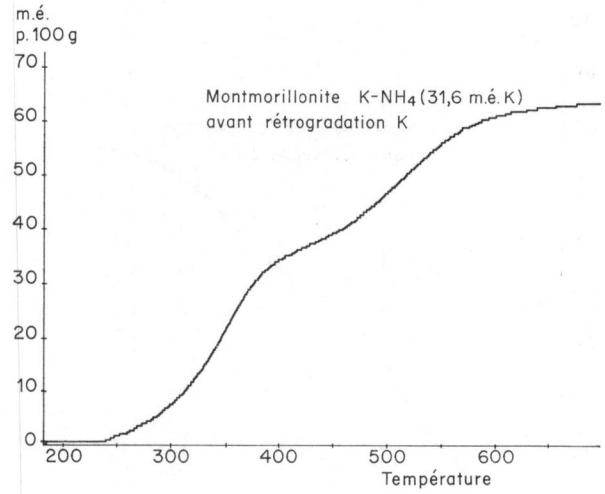
Montmorillonites K-NH_4.

Huit échantillons de montmorillonites K-NH_4 ont été préparés en traitant une montmorillonite K par des solutions de $ClNH_4$ de concentrations variables.

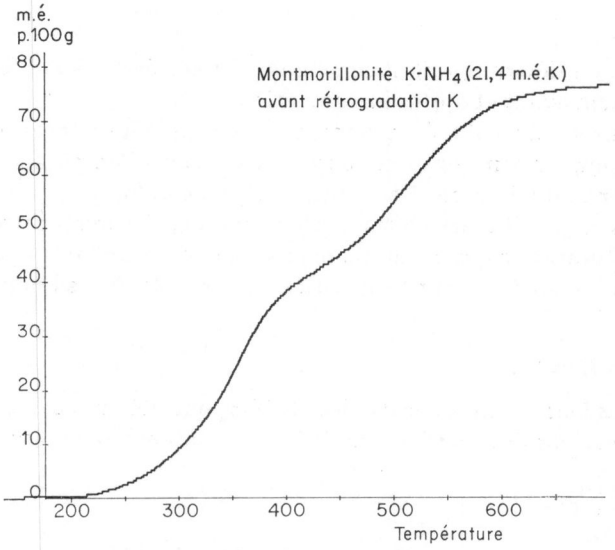


Courbe 5.

Les positions initiales des ions K échangeables ont été déterminées à partir des courbes de désorption de l'ammonium dans les montmorillonites K-NH_4 (courbes 5,6,7, correspondant aux échantillons 3, 6, 7).



Courbe 6.



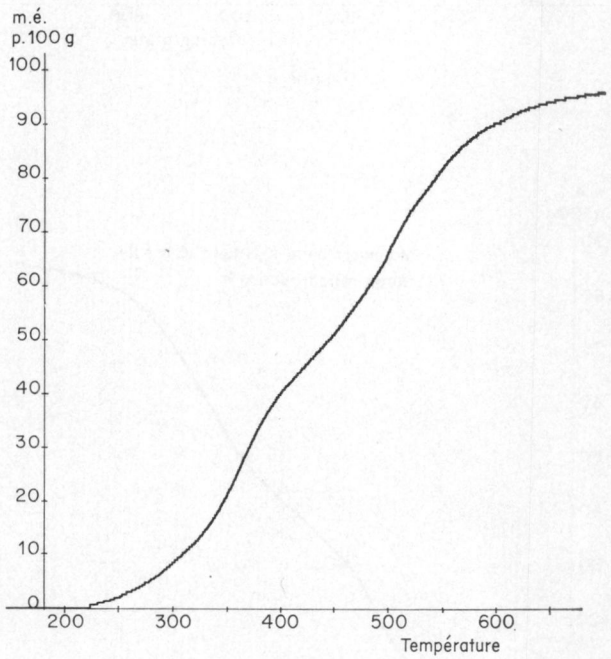
Courbe 7.

Les échantillons ont été soumis à dix alternances d'humidification et de dessiccation à 80°. On a dosé le potassium échangeable avant et après rétrogradation.

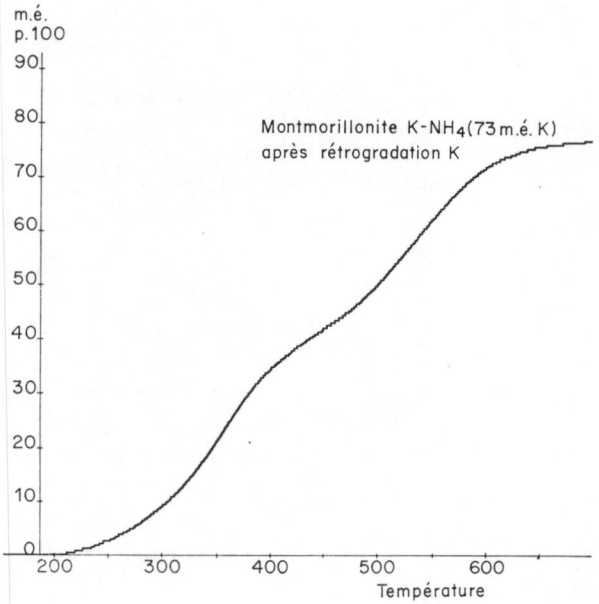
D'autre part, les courbes de désorption de l'ammonium ont été établies sur les échantillons soumis aux alternances de dessiccation et d'humidification et saturés ensuite d'ammonium. La courbe 8 concerne l'échantillon ne renfermant pas de potassium et les courbes 9, 10, 11, les échantillons 3, 6, 7.

Dosages de K échangeable (me. p. 100 g)

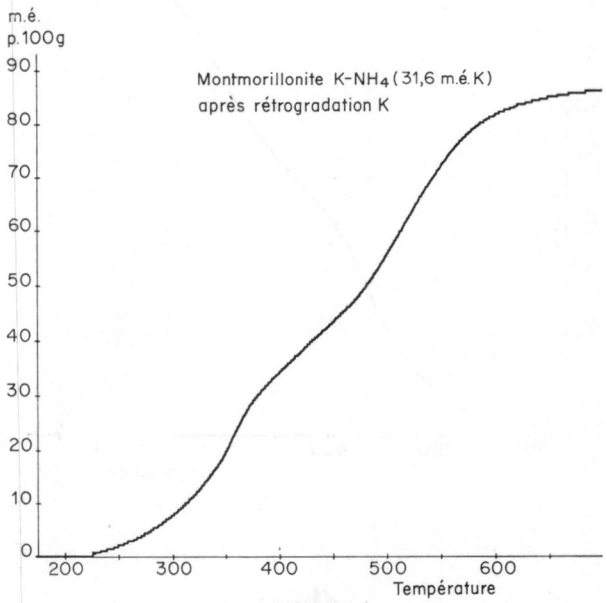
	Avant rétrogradation	Après rétrogradation	K rétrogradé
1	106	69,5	36,5
2	96	58,3	37,7
3	73	35,3	27,7
4	54,5	34,6	19,9
5	39,8	26,1	13,7
6	31,6	21,8	9,8
7	21,4	15,3	3,1
8	11,3	9,1	2,2



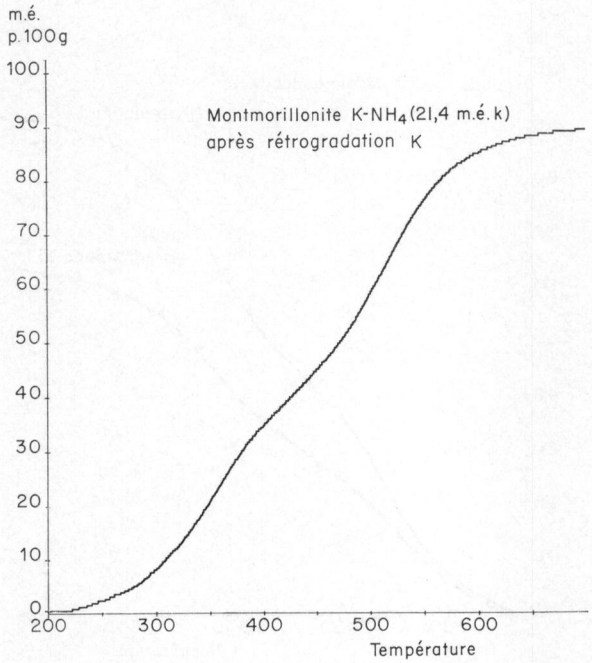
Courbe 8.



Courbe 9.



Courbe 10.



Courbe 11.

Les courbes de désorption établies avant rétrogradation du potassium montrent que les teneurs en potassium correspondant aux positions désorbables à 350° représentent de 0 à 20 me pour 100 g. A 400°, ces teneurs vont de 3 à 40 me.

Si l'on superpose les courbes de désorption de l'ammonium dans les échantillons saturés en NH_4 après rétrogradation, on constate que ces courbes sont confondues jusqu'à la température de 350°. Elles ne commencent à diverger qu'au-dessus de cette température.

Ainsi, quelle que soit l'importance de la rétrogradation (de 2,2 à 37,7 me pour 100 g), celle-ci n'affecte que les ions K situés en positions désorbables à plus de 350°.

Montmorillonite Li saturée.

La montmorillonite Li a été préparée par traitement d'une montmorillonite Na par LiCl, N.

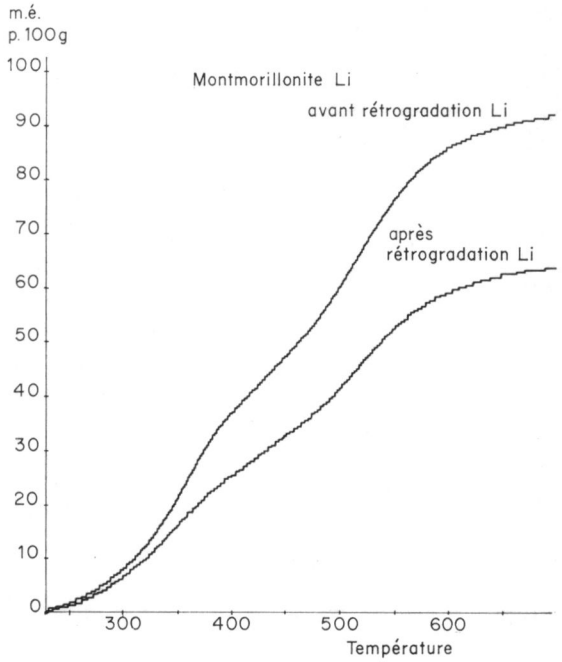
Le lithium échangeable a été extrait sur huit échantillons de la suspension de montmorillonite Li par traitement à l'acétate d'ammonium normal.

La quantité de Li échangeable était de 98,1 me pour 100 g ($\pm$ 1 me).

La rétrogradation du lithium a été obtenue en portant les échantillons de montmorillonite Li, 48 heures à 125°.

Après rétrogradation, la quantité restante de Li échangeable était en moyenne de 61,9 $\pm$ 0,3 me. La rétrogradation a donc porté sur 36,2 me de Li.

Les courbes (12) représentent la désorption de l'ammonium dans les échantillons, avant et après rétrogradation de Li.



Courbe 12.

Si l'on évalue d'après les courbes, les quantités d'ammonium désorbées aux différentes températures, on obtient les résultats suivants :

	300°	350°	400°	450°	500°	550°	600°	Max.
Avant rétrogradation (1)..	7,5	23	38,5	48,5	60,5	76,5	85,5	92,5
Après rétrogradation (2) ..	6	17	26	33	41,5	52,5	59	64
2/1 × 100	79,5	74	67,5	68	68,5	68,5	68,8	69

Contrairement à ce qui a été constaté pour la montmorillonite K, la diminution de la capacité d'échange se manifeste sur l'ensemble de la courbe de désorption.

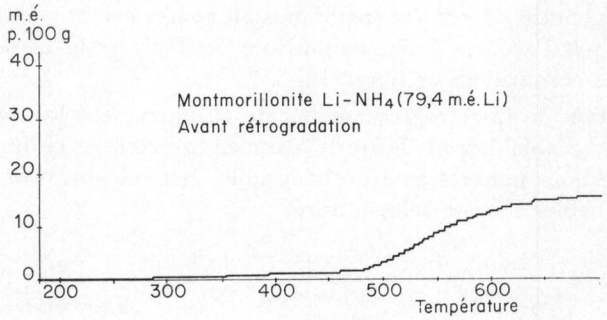
Montmorillonites NH_4-Li.

Ces montmorillonites ont été préparées en traitant une montmorillonite Li par des solutions de $ClNH_4$ de concentration variable.

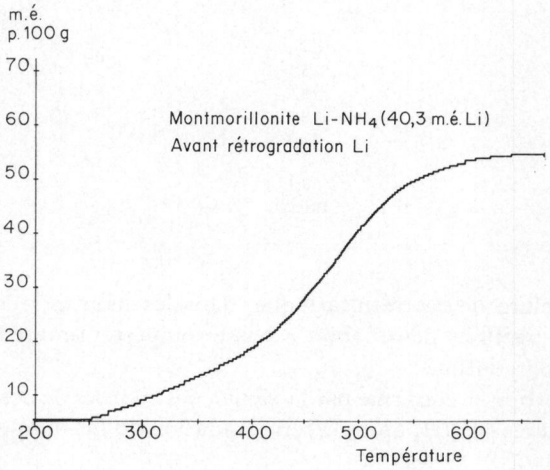
Les teneurs en Li restant ont été déterminées par déplacement à l'acétate d'ammonium normal (me pour 100 g).

1	99	5	27,8
2	79,4	6	22,5
3	56,5	7	10,9
4	40,3	8	4,5

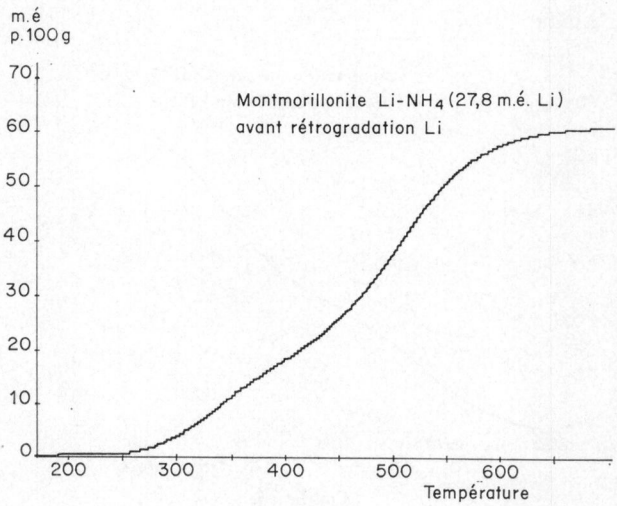
Les courbes de désorption de l'ammonium restant ont été établies pour tous les échantillons. Les courbes ci-après (courbes 13, 14, 15) concernent les échantillons 2, 4 et 5.



Courbe 13.



Courbe 14.



Courbe 15.

On voit d'après ces courbes que les ions NH_4 se sont fixés en priorité sur les positions désorbables à haute température. Ce même phénomène avait déjà été observé pour le déplacement d'autres cations par les ions NH_4 (CHAMINADE, 1965).

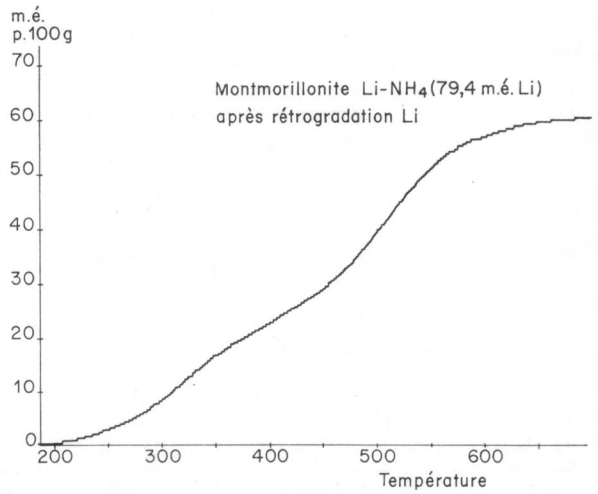
Tous les échantillons ont été maintenus 48 heures à l'étuve à 125°. Ils ont été ensuite traités par l'acétate d'ammonium afin de déplacer le Li resté échangeable et de saturer les échantillons en ions NH_4.

La proportion de Li rétrogradé augmente régulièrement lorsque la teneur initiale en Li échangeable décroît. D'après l'examen des courbes ci-dessus, on voit que dans les échantillons pauvres en Li échangeable, celui-ci se trouve surtout situé en positions désorbables à basse température.

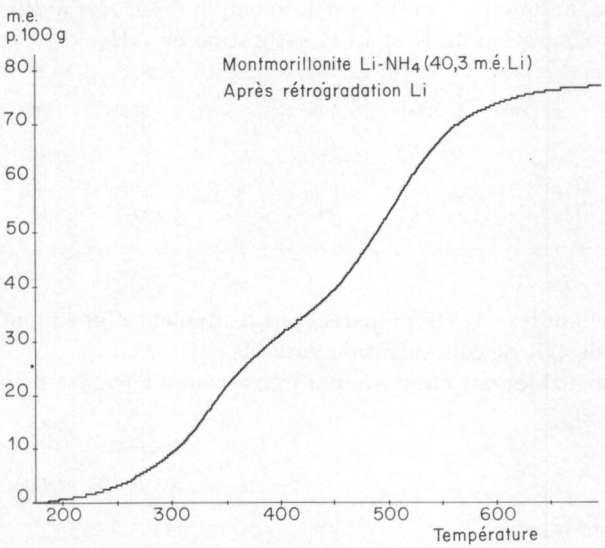
	Li échangeable restant	Li rétrogradé
1.....	54,4	44,6
2.....	43,1	36,3
3.....	29,5	27,0
4.....	18,9	21,4
5.....	11,3	16,5
6.....	8	14,5
7.....	3,1	7,8
8.....	traces	

On peut conclure de ces résultats que, dans les montmorillonites NH_4-Li, les ions Li situés en positions désorbables à basse température ont une tendance plus marquée à la rétrogradation.

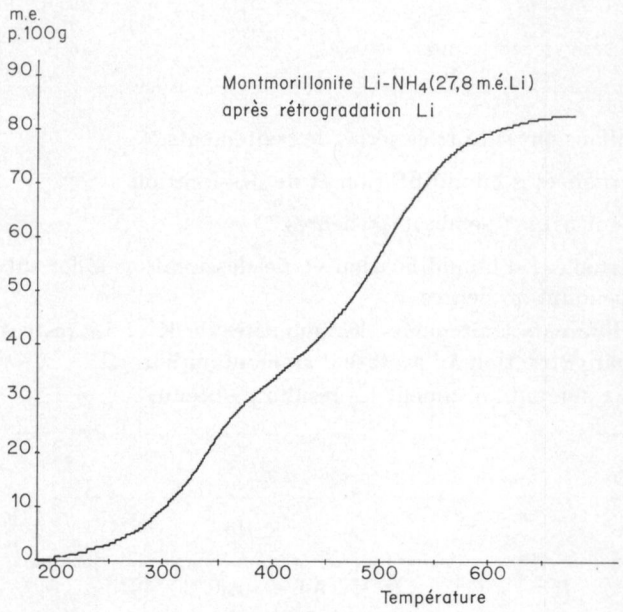
Cette constatation se confirme par l'examen des courbes de désorption des échantillons NH_4-Li saturés en NH_4 après la rétrogradation du lithium (courbes 16, 17, 18).



Courbe 16.



Courbe 17.



Courbe 18.

Les essais réalisés avec les montmorillonites NH_4-K (courbes 9, 10, 11) avaient montré que l'ion K avait un comportement très différent, la rétrogradation du potassium n'affectant que les ions K situés en position désorbable à plus de 350°.

Ces faits sont illustrés par l'exemple ci-dessous concernant des montmorillonites NH_4-K et NH_4-Li dans lesquelles les rétrogradations de K et Li étaient globalement

égales. Le tableau indique les quantités d'ammonium désorbées à différentes températures après rétrodagration de K et Li et saturation en NH_4.

	300°	350°	400°	450°	500°	550°	600°	Max.
Montmorillonite K — NH_4	8	20	33,5	40,5	49	60	67,5	71
Montmorillonite Li — NH_4	6,5	17,1	26	35	47,5	61	67,6	71

Montmorillonites K-Li.

Ces montmorillonites ont été préparées par traitement d'une montmorillonite Li par des solutions de ClK de concentration variable.

Li et K échangeables ont été dosés par extraction à l'acétate d'ammonium normal (me pour 100 g).

	K	Li	K + Li
1	traces	100,5	100,5
2	32	64,6	96,6
3	53,8	46,3	100,1
4	74,5	28,1	102,6
5	82,2	15,3	97,5
6	102	3,6	105,6

Les échantillons ont subi trois séries de traitements :

1. Dix alternances d'humidification et de dessiccation à 80°.

2. Traitement à 125° pendant 48 heures.

3. Dix alternances d'humidification et de dessiccation à 80° suivies d'un traitement à 125° pendant 48 heures.

Après ces différents traitements, les quantités de K et Li restées échangeables ont été dosées par extraction à l'acétate d'ammonium normal.

Les tableaux suivants résument les résultats obtenus :

I. — *Dosages K*

Numéros	A	B	C	D	K rétrogradé A-B	K rétrogradé A-C	K rétrogradé A-D	K rétrogradé % K échangeable B	K rétrogradé % K échangeable C	K rétrogradé % K échangeable D
1	traces	traces	traces	traces						
2	32	18,2	23,2	15,5	13,8	8,8	16,5	43	27,5	51,5
3	53,8	32	44,2	23,1	21,8	9,6	30,7	40,5	17,8	57
4	74,5	47,6	61,3	36,3	26,9	13,2	38,2	36,2	17,7	51,5
5	82,2	56,7	72,5	46	25,5	9,7	36,2	34,3	13	48,6
6	102	72,5	89	68,6	27,5	13	33,4	27	12,8	32,8

II. — *Dosages Li*

Numéros	A	B	C	D	Li rétrogradé			Li rétrogradé % Li échangeable		
					A-B	A-C	A-D	B	C	D
1	100,5	87,8	51,5	52,9	12,7	49	47,7	12,6	48,5	47,5
2	64,6	58,5	35	27	6,1	29,6	37,6	9,4	46	58,2
3	46,3	39	22,4	17,9	7,3	23,9	28,4	15,7	51,5	61,5
4	28,1	21,2	13,4	9,6	6,9	14,7	18,5	24,6	52,5	66
5	15,3	10,5	6,6	5	4,8	8,7	10,3	31,4	57	67,5
6	3,6	2,8	2,4	1,8	0,8	1,2	1,8	22,2	33,3	50

A : K ou Li échangeable ; B : K ou Li échangeable après 10 dessications; C : K ou Li échangeable après traitement à 125° ; D : K ou Li échangeable après 10 dessications suivies du traitement à 125°.

L'examen de ces résultats met en évidence les faits suivants :

1° les dix dessiccations à 80° provoquent une forte chute du taux de potassium échangeable ; la proportion de potassium rétrogradé varie en raison inverse de la quantité de potassium échangeable ;

en ce qui concerne le lithium, les dix dessiccations entraînent une légère rétrogradation ;

2° la teneur en potassium échangeable diminue après le traitement à 125°. Mais cette diminution est beaucoup moins importante que celle résultant des dix dessiccations ;

par contre, le traitement à 125° provoque une forte rétrogradation du lithium, celle-ci étant relativement plus importante pour les faibles doses de Li échangeable ;

3° les deux traitements combinés accentuent les phénomènes de rétrogradation ;

4° il existe une composition optimum de la montmorillonite par laquelle la rétrogradation cumulée des deux éléments passe par un maximum.

K + Li rétrogradés (me p. 100 g)
(Traitement D)

1	47,6
2	54,1
3	59,1
4	56,7
5	46,5
6	35,2

Relation entre teneur en potassium échangeable initial et rétrogradation.

L'examen des proportions de K rétrogradé en fonction de K échangeable initial, dans les montmorillonites bi-ioniques étudiées, donne les résultats suivants :

Montmorillonite K-NH_4		Montmorillonite K-Ca		Montmorillonite K-Li	
K éch. initial	K rétrogradé % K éch. initial	K éch. initial	K rétrogradé % K éch. initial	K éch. initial	K rétrogradé % K éch. initial
106	38,8	112	39,6	102	27
96	39,2	81,5	43,5	82,2	34,3
73	38	72	49,5	74,5	36,2
54,5	36,5	53,9	54	53,8	40,5
39,8	34,4	41	53	32	43
31,0	31	37,8	58		
21,4	28,4	27,8	57		
11,3	19,5	22,9	55,5		
		14,2	49,5		

La montmorillonite K-NH_4, a été obtenue par traitement d'une montmorillonite K par NH_4Cl. On sait que, dans ces conditions, NH_4 déplace en priorité les ions K désorbables à haute température c'est-à-dire les ions K les plus susceptibles de rétrograder. Dans ces conditions, on comprend que la proportion de K rétrogradé, diminue lorsque la teneur en K échangeable — restant après déplacement partiel par NH_4 — diminue.

La montmorillonite K-Li a été préparée par traitement d'une montmorillonite Li par KCl.

Si le déplacement de Li par K se passe de la même façon que le déplacement de NH_4 par K, les ions K déplacent en priorité les ions Li correspondant aux positions désorbables à haute température. Au début du déplacement, les ions K fixés en échange avec Li sont donc en position désorbable à haute température, et susceptibles de rétrograder fortement. Le pourcentage de K rétrogradé va diminuer lorsque la teneur en K échangeable initial augmente.

En ce qui concerne les montmorillonites K-Ca, elles ont été préparées par traitement de montmorillonites Ca par KCl. Si l'on admet que le déplacement de Ca par K suit les mêmes lois que le déplacement de NH_4 et de Li, c'est-à-dire que les ions K déplacent en priorité les ions Ca occupant des positions désorbables à T élevée, la rétrogradation doit être relativement plus importante dans les échantillons à faible teneur en K. Les résultats expérimentaux confirment cette hypothèse.

Rétrogradation maximum de K et Li.

Une montmorillonite K a été soumise à 10 alternances d'humidification et de dessiccation à 80°.

Elle a été ensuite traitée par une solution de ClLi, N pour remplacer K resté échangeable par Li.

Enfin, la montmorillonite Li ainsi obtenue a été maintenue 48 heures à 125°.

Les quantités de K et de Li échangeables ont été dosées et les courbes de désorption de NH_4 établies, après chaque traitement.

Moyenne de 4 répétitions

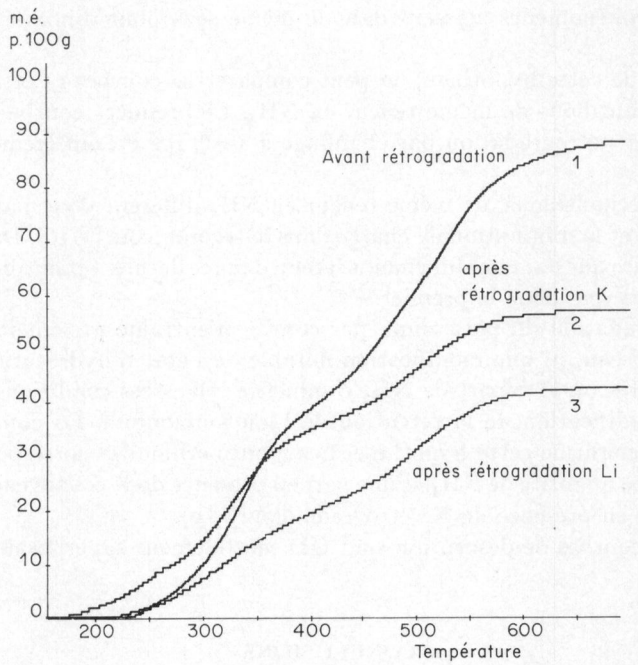
K échangeable initial.....	113,5 me. pour 100 g
K échangeable après rétrogradation.....	74,2
Li échangeable avant rétrogradation	72,2
Li échangeable après rétrogradation	42,2

Après ces traitements, la capacité d'échange de la montmorillonite n'était plus que de 42,2 me. pour 100 g et la rétrogradation portait sur 39,3 me. de K et 30 me. de Li bloquant plus de 60 p. 100 des positions d'échange.

Les courbes 19 montrent l'influence des phénomènes sur les courbes de désorption de l'ammonium.

La courbe 19-1 représente la désorption de l'ammonium dans la montmorillonite initiale, la courbe 19-2 a été établie après rétrogradation du potassium et la courbe 19-3 après rétrogradation du lithium.

Dans la courbe 19-2, on constate que la quantité d'ammonium désorbée n'est pas diminuée jusqu'à 350°. On constate même une augmentation de cette quantité. Au-delà de 350°, la quantité d'ammonium désorbée décroît fortement, par rapport à la courbe témoin, du fait du blocage de positions d'échange dû à la rétrogradation du potassium.



Courbe 19.

Après rétrogradation du lithium (courbe 3), la diminution de la quantité d'ammonium désorbé se manifeste sur l'ensemble de la courbe de désorption.

DISCUSSION

Des hypothèses peuvent être formulées pour expliquer les faits observés concernant le comportement des ions Li^+ et K^+ et leur influence sur la désorption de NH^{4+}.

Au cours du chauffage, NH_4 adsorbé subit une décomposition libérant des protons. L'acidité résultante stabilise les ions NH_4 restants.

Une seconde cause d'acidification provient de la dissociation de l'eau résiduelle. Cette action sera d'autant plus marquée que la quantité d'eau superficielle est plus élevée, c'est-à-dire que les ions fixés sont plus hydratés.

Cette hypothèse se confirme par la comparaison des courbes 6 et 15 relatives à des montmorillonites bi-ioniques NH_4-K et NH_4-Li dont la teneur en NH_4 est très voisine.

On constate que dans la montmorillonite K-NH_4, la désorption de NH_4 se produit beaucoup plus rapidement que dans la montmorillonite Li-NH_4.

Or, on sait que les ions Li^+ sont plus hydratés que les ions K^+.

D'autre part, la rétrogradation des ions Li correspond à un passage de ceux-ci dans la couche octaédrique.

Il en résulte une diminution de la charge nette du réseau et de la quantité d'eau adsorbée en surface et coordonnée aux ions compensateurs.

Les deux phénomènes agissent dans le même sens pour diminuer la rétention des ions NH_4.

A l'appui de cette hypothèse, on peut comparer les courbes 15 et 16 correspondant à des échantillons de même teneur en NH_4. Le premier (courbe 15) renferme 27,8 méq. Après rétrogradation par chauffage à 125°, il a été entièrement saturé en NH_4.

Les deux échantillons, de même teneur en NH_4 diffèrent donc par l'absence de Li échangeable et la diminution de charge dans le second (courbe 16). Dans ces conditions, on constate que l'ammonium moins retenu dans ce dernier échantillon, se désorbe plus rapidement que dans le premier.

La rétrogradation du potassium, par contre, n'entraîne pas une diminution de la charge du réseau, ni une modification notable de l'état d'hydratation superficiel aux températures où le départ de NH_3 commence. Dans ces conditions, on ne constate pas de modification de la rétention de l'ion ammonium. La comparaison des courbes 7 et 9 confirme cette hypothèse. Les montmorillonites correspondantes renferment la même quantité de NH_4, d'une part en présence de K échangeable (courbe 7) et d'autre part en présence de K rétrogradé (courbe 9).

Les deux courbes de désorption sont très sensiblement superposables.

CONCLUSIONS

L'utilisation des courbes de désorption en fonction de la température de l'ammonium fixé par les argiles permet d'apporter des données nouvelles sur le phénomène de rétrogradation des ions potassium et lithium.

Cette technique montre que la possibilité de rétrogradation des ions potassium dépend de leur position.

La diminution de la quantité d'ions ammonium fixés après rétrogradation du potassium, ne se produit que pour les ions ammonium désorbables à des températures dépassant 350°.

Au contraire, en ce qui concerne les ions lithium, la rétrogradation est indépendante de leur position.

Ces résultats confirment qu'il existe une différence dans les mécanismes intervenant dans la rétrogradation de ces deux cations.

Reçu pour publication en juin 1968.

SUMMARY

ALTERATION OF POTASSIUM AND LITHIUM IONS INTO NON-EXCHANGEABLE FORMS. INVESTIGATION OF THE PROCESS BY MEANS OF THE DESORPTION CURVES OF THE AMMONIUM ION OBTAINED BY HEAT

The technique used for investigating desorption by heat of clay-fixed ammonium ions was applied to the study of the retrogradation phenomena of potassium and lithium ions in a montmorillonite.

The main features of this experimental method are the following : the K montmorillonites were alternately subjected to humidification and drying at 80°C.

For the Li-montmorillonites, the retrogradation of lithium was achieved by heating the clay at 125°C for 48 hours.

After retrogradation of the K and Li cations, the montmorillonites were saturated with ammonium. The desorption curves of ammonium fixed prior to and after retrogradation then compared.

The results achieved show that the decrease in the amount of ammonium ions fixed after retrogradation of the potassium occurs only for ions which are desorbable at temperatures higher than 350°C. It may be concluded therefrom that the chances of retrogradation of all the potassium ions are not the same, as the phenomenon depends of the position of these ions.

As regards Lithium, the amount of ammonium fixed after retrogradation of the Lithium is lessened all along the desorption curve, this apparently meaning that such a retrogradation of the Lithium ions is unconnected with their position.

These results confirm that the retrogradation mechanisms of Potassium and Lithium ions are of different nature.

ZUSAMMENFASSUNG

ÜBERGANG DER KALIUM-UND LITHIUMIONEN ZUM UNAUSTAUSCHBAREN ZUSTAND. UNTERSUCHUNG DIESES PHÄNOMENS AN HAND DER DURCH WÄRME ERHALTENEN UNTERSUCHUNG DIESES PHANOMENS AN HAND DER DURCH WARME ERHALTENEN DESORPTIONSKURVEN DES AMMONIUMIONS

Die Untersuchung technik der Desorption in Abhängigkeit von der Temperatur des durch Ton fixierten Ammoniumions wurde für die Untersuchung der Retrogradierungsphänomene der Kalium- und Lithiumionen in einem Montmorillonit verwendet.

Das Prinzip dieser Methode ist folgendes :

Die K-Montmorillonite werden der Wirkung eines Anfeuchtungs-und Trocknungswechselverfahren bei 80° ausgesetzt.

Für die Li-Montmorillonite wird die Retrogradierung des Lithiums durch Erwärmung des Tons auf 125° während 48 St. erhalten.

Nach Retrogradierung der K- und Li-Kationen werden die Montmorilloniten mit Ammonium gesättigt. Die Desorptions-kurven des fixierten Ammoniums werden vor und nach der Retrogradierung verglichen.

Die erhaltenen Ergebnisse zeigen, dass die nach Retrogradierung des Kaliums verminderte Menge an fixierten Ammoniumionen nur für die bei Temperaturen über 350° desorptions fähigen Ammoniumionen auftritt. Daraus darf man folgern, dass die gesamten fixierten Kaliumionen nicht dieselbe Retrogradierungswahrscheinlichkeit aufweisen, da das Phänomen von der Stellung der Kaliumionen abhängt.

Was das Lithium anbetrifft, tritt die nach der Retrogradierung des Lithiums festgestellte Mengenverminderung an fixierten Ammonium bei der gesantem Desorptionskurve auf. Es scheint daher dass die Retrogradierung der Lithiumionen unabhängig von ihrer Stellung sei.

Diese Ergebnisse bestätigen, dass die bei der Retrogradierung der Kalium- und Lithiumionen wirkenden Mechanismen von verschiedener Art sind.

РЕЗЮМЕ

Переход ионов калия и лития в необменное состояние. Изучение этого явления при помощи кривых десорбции теплом иона аммония.

Р. Шаминад.

при техническом сотрудничестве А. М. Табаро.

Для изучения явлений ретроградации ионов калия и лития в монтмориллоните автор использовал технику наблюдения десорбции иона аммония связанного глинами, в зависимости от температуры. Принцип этого экспериментального метода заключается в следующем :

— Монтмориллониты калия подвергаются попеременным увлажнению и сушке при 80°.

— В случае монтмориллонитов лития ретроградация этого элемента получается нагреванием глины в течении 48-ми часов при 125°.

По окончании ретроградации катионов K и Li монтмориллониты насыщаются аммонием и сравниваются кривые десорбции этого элемента, связанного до, или после ретроградации.

Полученные результаты показывают что уменьшение количества ионов аммония связанных после ретроградции калия, касается только ионов способных к десорбции при температурах выше 350°. Из этого можно заключить, что ретроградация возможна не для всех связанных ионов калия, так-как явление это зависит от положения этих ионов.

Что-же касается лития, то уменьшение количества аммония связанного после ретроградации лития, отмечается на всем протяжении кривой десобрции.

Эти результаты подтверждают различие природы механизмов принимающих участие в ретроградации ионов калия и лития.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

CHAMINADE R., 1940. Fixation de l'ion NH_4 par les colloïdes argileux des sols, sous forme non échangeable. *C. R. Acad. Sci.*, **210**, 264-266.

CHAMINADE R., 1965. Recherches sur la désorption en fonction de la température de l'ion ammonium fixé par les argiles. *Ann. agron.*, **16** (6), 637-66[1].

GLAESER R., MERING J., 1967. Effets de chauffage sur les montmorillonites saturées de cations de petit rayon. *C. R. Acad. Sci.*, **265**, 833-835.

HOFMANN U., KLEMEN R., 1950. Verlust der Austauchfähigeit von Lithium ionen und Bentonit durch Erhitzung. *Z. Anorg. Chem.*, **262**, 95-99.

SCHUFFELEN A. C., VAN DER MAREL H. W., 1955. Potassium fixation in soils. Potassium symposium. *Inst. intern. de la Potasse*, 157-201.

Ann. agron., 1968, **19** (6), 653-683.

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DE L'INFLUENCE DES CONDITIONS DE MILIEU SUR LA RÉPARTITION DE L'AZOTE DANS LE SOL

I. — Principales formes d'azote obtenues par hydrolyse [1]

J. DECAU
avec la collaboration technique de A. Pace

Station d'Agronomie et d'Œnologie, 67, Boulevard Deltour, 31 - Toulouse
Institut national de la Recherche agronomique

SOMMAIRE

Il est montré, par l'analyse de 92 sols ou horizons de sol, que la répartition des principales formes d'azote obtenues par hydrolyse (azote aminé, ammoniacal et insoluble), varie en fonction des conditions pédoclimatiques et culturales ainsi que, dans les profils, en fonction de la profondeur.

Ces facteurs interviennent principalement par leur action variable sur certains processus physiques (lessivage), physico-chimiques (adsorption et rétrogradation) et biologiques (organisation, humification, minéralisation) qui régissent la dynamique de l'azote dans le sol.

I. — INTRODUCTION

L'intérêt scientifique que présente l'étude de l'alimentation des plantes en azote et l'importance économique de cet élément en agriculture ont suscité de très nombreuses recherches. Un de leurs principaux objets a été l'étude de l'azote minéral du sol. En comparaison, l'azote organique, qui représente pourtant la plus grande partie de l'azote total, a retenu l'attention d'un plus petit nombre de chercheurs.

[1] Première partie d'une Thèse de Doctorat ès Sciences naturelles soutenue à Clermont-Ferrand en 1967 (n° E 74).
La deuxième partie de cette étude paraîtra dans le n°1/1969 des Annales agronomiques.

Des difficultés analytiques ont longtemps limité les études dans ce domaine, et il a fallu attendre les techniques chromatographiques récentes pour donner un certain essor à ces études.

Depuis plus d'un demi-siècle cependant, des chercheurs ont essayé d'identifier et de doser les composés organiques azotés du sol. L'origine végétale de la matière organique du sol les a conduits à appliquer à ces composés les méthodes employées dans l'analyse des végétaux. Aussi, dans la plupart des travaux, la solubilisation des composés azotés a-t-elle été obtenue par hydrolyse acide. Après hydrolyse, deux voies analytiques ont été suivies : d'une part la scission des composés azotés en groupes plus ou moins identifiables à des substances connues, azote ammoniacal et aminé, azote basique, azote de l'humine (VAN SLYKE, 1911, 1912, 1915), d'autre part l'isolement de composés particuliers tels que l'arginine (SCHREINER et SHOREY, 1910), l'acide diaminopimélique (BREMNER, 1950) et l'N-acétyl-D-glucosamine (STEVENSON, 1956 *a*).

Ces deux types de travaux ont fourni de très nombreuses données. Ainsi, notamment, les techniques de fractionnement simple de la masse des composés azotés solubilisés par hydrolyse ont permis de montrer, dans de très nombreux milieux, la prédominance, par rapport aux autres formes d'azote, de l'azote inclus dans les acides aminés ; en même temps, les techniques d'isolement de corps particuliers permettaient l'identification et le dosage de composés azotés de plus en plus nombreux (STEVENSON, 1956 *a*).

Mais, si ces travaux ont fourni de nombreuses données analytiques, ils n'ont guère permis, pour la plupart, de relier la répartition des composés organiques azotés aux conditions dans lesquelles ces substances prennent naissance ou évoluent, soit parce que la distribution de l'azote organique dépend peu de ces conditions, soit parce que la faible précision des techniques et le nombre limité des milieux considérés dans chaque étude n'ont pas permis l'observation de telles relations. En vue d'accroître notre connaissance dans ce domaine et d'apporter de nouveaux éléments pour une meilleure compréhension du métabolisme azoté des sols, il nous a paru nécessaire d'entreprendre tout d'abord un travail d'exploration, une enquête en quelque sorte, aussi vaste que possible, afin de déterminer, dans des milieux bien définis, l'importance de leurs principales fractions azotées et la composition qualitative et quantitative de l'azote aminé, en relation avec les conditions pédoclimatiques et culturales.

A partir des observations ainsi recueillies, nous avons été naturellement conduit à rechercher les mécanismes par lesquels les conditions de milieu peuvent agir sur la répartition des composés azotés et, ainsi, à étudier tout particulièrement l'un de ces processus au cours d'essais de laboratoire.

Ce travail comprend trois parties : l'étude des principales fractions azotées obtenues par hydrolyse, l'analyse particulière de l'une de ces fractions et la recherche des modalités d'action d'un des facteurs naturels, l'aération, sur la répartition de l'azote. La présente publication traite de la première approche analytique,c'est-à-dire de l'étude des formes d'azote obtenues après hydrolyse.

Le rôle des caractères climatiques, pédologiques et culturaux de chacun des milieux étudiés a tout d'abord été examiné. Nous avons recherché ensuite par quel mécanisme ces facteurs peuvent agir sur l'équilibre de l'azote organique du sol et sur la dynamique de cet élément.

II. — MILIEUX ÉTUDIÉS ET TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES

A. — Milieux étudiés

Quatre-vingt douze sols ou horizons de sols ont été choisis, qui diffèrent nettement entre eux par leur origine géographique, leur histoire culturale et par la fumure et les amendements reçus ; dans certains sols, des horizons successifs, de profondeur variable, ont été étudiés. A cette diversité de provenance et d'histoire culturale s'ajoute la diversité des conditions pédologiques rencontrées. Celles-ci ont pu être caractérisées et précisées grâce à la détermination de la teneur éventuelle en calcaire, du pH, de la composition granulométrique, de la teneur en matière organique et du rapport carbone/azote.

Ces divers dosages permettent de définir le type textural (Malterre et Alabert, 1963) et, dans les profils, avec l'examen visuel des niveaux successifs, le type et la nature pédologiques des milieux (Duchaufour, 1960).

Les principales données obtenues sont réunies dans le tableau 1 dans lequel figurent en outre le signe représentatif de chaque milieu et le groupe auquel il appartient.

B. — Méthodes de dosage

1. *Détermination des principales formes d'azote du sol*

Les milieux choisis ont été soumis à une hydrolyse chlorhydrique. Après comparaison de diverses conditions opératoires, les techniques suivantes ont été adoptées :

— Sols renfermant moins de 5 p. 100 de matière organique : 10 g de sol sont mis au contact de 60 ml d'acide chlorhydrique 6 N dans une fiole de 250 ml. Celle-ci est maintenue dans un autoclave à 120°C pendant 6 heures.

— Milieux riches en matière organique : la prise d'échantillon est diminuée, réduite même à 1 g dans les milieux très riches.

Après hydrolyse, la solution chlorhydrique est filtrée et le résidu de sol lavé à l'eau chaude jusqu'à obtention d'un filtrat incolore.

Trois formes d'azote sont alors déterminées :

— « l'azote insoluble », contenu dans le résidu d'hydrolyse,

— l'azote solubilisé distillable sous forme ammoniacale lorsque le filtrat a été amené à la normalité en soude (« azote ammoniacal »)

— l'azote solubilisé stable dans ces conditions.

L'alcalinisation par la soude et le chauffage du filtrat chlorhydrique ont pour effet de détruire la fraction des sucres aminés qui a résisté à l'hydrolyse acide de sorte que la totalité de l'azote des sucres aminés se trouve dosée dans l'azote ammoniacal (Stevenson, 1956 *b*).

Pratiquement, l'azote insoluble est déterminé par minéralisation kjeldahl, l'azote ammoniacal par entraînement à la vapeur et l'azote solubilisé stable par différence entre l'azote solubilisé total (kjeldahl) et l'azote ammoniacal.

Aucune de ces trois formes d'azote n'appartient à un groupe défini de substances azotées originelles du sol. Ainsi l'azote ammoniacal provient à la fois d'ions ammonium préexistant dans le sol, de sucres aminés, mais aussi d'autres composés azotés labiles (cf. tabl. 2) dans les conditions de l'hydrolyse ou de la distillation. Cependant, l'azote solubilisé stable est, pour sa plus grande part, inclus dans des acides aminés comme l'ont prouvé les observations de Stevenson (1956 *b*) et nos propres analyses. De ce fait, nous désignerons cette forme d'azote, dans la suite de ce chapitre, sous le terme abrégé « d'azote aminé ».

Déterminations complémentaires

Dans certains échantillons, le fractionnement de l'azote du sol en azote aminé, ammoniacal et insoluble a été complété par la détermination des principaux composants de l'azote dosé sous forme ammoniacale : l'azote ammoniacal échangeable, l'azote ammoniacal rétrogradé (c'est-à-dire retenu sur les surfaces internes des argiles, des illites notamment) et l'azote des sucres aminés ont été ainsi dosés respectivement par les méthodes de Drouineau et Lefèvre (1949), de Dhariwal et Stevenson (1958), et de Stevenson (1957).

TABLEAU I

Principaux caractères des milieux étudiés

A — sols arables

N°	Origine géographique	Cultures ou végétation naturelle	Fertilisation	M. o. % de sol	C/N	Type textural	Signe (1) représentatif	Groupes (2)
1	Région parisienne	Rotation plantes-racines	S. fum. dep. 84 ans	1,58	8,8	Limons fins	○	SaFr SSF
2		céréales depuis 30 ans	S. fum. dep. 57 ans	1,63	8,6	argilo-sableux		SaFr SSF (P + T)
3	Grignon		Fert. minér. NPK 80, 84, 60	1,93	8,9	nettement calcaires		SaFr SAE (P + T)
4	(Champ de Déhérain)		Avec fumier (10 t/ha/an)	2,30	9,1		●	SaFr SAF
								SAF (P + T)
5	Région parisienne		S. fum. dep. 30 ans	1,67	9,2		○	SaFr SSF
								SSF (P + T)
6		S. végétation	Avec nitrate de chaux (150 N/ha/an)	1,70	9,3	Limons		SaFr SAE (P + T)
6′	Versailles (42 parcelles)	depuis 30 ans	Av. sulfate d'ammoniaque (150 N/ha/an)	1,65	9,6	argilo-sableux		
7			Avec fumier (100 t/ha/an)	3,66	9,6		●	SaFr SAF
								SAF (P + T)
10	Région toulousaine	Culture maraîchère	S. fum. dep. 12 ans	2,25	14,4	Limons	○	SaFr SSF
11	Toulouse	depuis 12 ans	Fert. minér. NPK (200, 200, 360)	2,48	13,3	argilo-sableux		SSF (P + T)
								SaFr SAE (P + T)
12			Fumier artificiel (50 t/ha/an + NPK)	3,13	13,7	très légèrement	●	SaFr SAF
								SAF (P + T)
13	(O. N. I. A.)		Paille (20 t/ha/an + NPK)	3,03	13,2	calcaires		
14	Région toulousaine		S. fum. dep. 12 ans	1,89	8,5		○	SaFr SSF
								SSF (P + T)
15	Thibaut		Fert. minér. NPK (60, 60, 75)	2,15	8,8	Limons sableux		SaFr SAE (P + T)
16	Bloc 1	Rotation blé-maïs	Fumier (20 t/ha tous les 3 ans)	2,06	8,9		●	SaFr SAF
								SAF (P + T)
17		depuis 12 ans	S. Fum. dep. 12 ans	1,26	8,8		○	SaFr SSS
								SaFr SSS (P + T)
18	Bloc 4		Fert. minér. (60, 60, 75)	1,34	9,4			SaFr SAE
19			Fumier (20 t/ha/an tous les 3 ans)	1,50	9,9		●	SaFr SAF (P + T)

TABLEAU I (suite)

N°	Origine géographique	Cultures ou végétation naturelle	Fertilisation	M. o. % du sol	C/N	Type textural	Signe (1) représentatif	Groupes (2)
54	Rég. méditerranéenne		S. fum. dep. 12 ans	2,63	11,8	Argiles	○	SaFr SSF
55	Grasse (jardin d'essais)	S. végétation	S. fum. dep. 12 ans	2,13	9,2	limoneuses	○	SaFr SSF
56		depuis 12 ans	Avec fumier de bovins 33 t/ha/an	2,68	8,0	calcaires	●	SaFr SAF
57			Avec fumier de bovins 33 t/ha/an	3,03	10,8		●	SaFr SAF
58	Rég. méditerranéenne	S. végétation	Avec fumier d'ovins					
		depuis 12 ans	(22 t/ha/an)	3,37	9,9	Argiles		SaFr
59	Grasse (jardin d'essais)		Avec fumier d'ovins	3,03	9,5	limoneuses		SaFr
60			Avec paille (11 t/ha/an)	3,08	10,5	calcaires		SaFr
61			Avec paille (11 t/ha/an)	2,65	10,4			SaFr
	Région toulousaine							
51	Maury A	Prairie permanente		3,53	8,1	Argiles sableuses		SaFr
52	Maury B	retournée	S. fum.	3,22	7,7			SaFr
53	Mauvezin	Prairie retournée		6,32	12,3			SaFr
	Cameroun							
66	M-banga	Bananiers dep. 20 ans	Fum. minérale localisée,	5,22	12,4	Argile	×	SaCn
67	Nyombé	Bananiers dep. 4 ans	principalement azotée	11,04	11,2	Limon sableux	×	SaCn
				5,19	10,3	Sable limoneux	×	SaCn
68	—	succédant à cultures		4,03	10,3	Sable	×	SaCn
69	—	vivières		4,67	12,7	Sable argileux	×	SaCn
70	—			5,05	10,1	Limon fin sableux	×	SaCn
71	—							

B — profils

20				10,00	17,3	Sol lessivé	A_1	△	Hs
21	Région toulousaine	Forêt de chênes	Sans fumure	3,23	12,9	à pseudogley	A_2		Hm
22				2,46	13,0		B		Hm
23	Bouconne			2,06	11,1		Bg	□	Hp
24				1,17	13,6		Bg	□	Hp

TABLEAU I (suite)

N°	Origine géographique	Cultures ou végétation naturelle	Fertilisation	M. o. % de sol	C/N	Type pédologique	Nat. des horizons	Signe (1) représentatif	Groupes (2)
25				7,00	12,9	Horizons lessivés transportés	A_1	△	Hs
26	Région toulousaine	Prairie naturelle	Sans fumure	4,59	11,6	reposant sur	A_1	△	Hs
27				2,06	10,5	complexes	A_2		Hm
28	Bouconne			1,12	9,6	d'altération en place	C	□	Hp
29	Région toulousaine			4,56	17,4	Sol lessivé	A	△	Hs
30		Forêt de chênes	Sans fumure	1,70	11,8	à pseudogley	B		Hm
31	Poucharramet			1,05	9,8		Bg	□	Hp
32	Région toulousaine			1,05	8,7	Sol lessivé	A	△	Hs
33		Vigne	Sans fumure	0,67	7,6	à pseudogley	B		Hm
34	Lavernose			0,62	7,2		Bg	□	Hp
35	Région toulousaine			3,61	11,7		A	△	Hs
36	Villefranche-de-Laura-	Prairie permanente	Sans fumure	2,60	9,5	Sol brun	A		Hm
37	gais			1,32	8,0		(B)	□	Hp
38	Région toulousaine			10,26	15,4		A	△	Hs
39		Prairie permanente	Sans fumure	5,90	13,1	Rendzine	A	△	Hs
40	Lahitère A			2,32	9,8		A		Hm
41	Région toulousaine	Flore des zones	Sans fumure	7,71	11,8	Sol calcimorphe	A	△	Hs
42	Lahitère B	humides (Joncacées)		2,43	9,6	hydromorphe	A		Hm
43	Région toulousaine	Prairie permanente	Sans fumure	12,84	16,2	Sol brun	A_1	△	Hs
44				7,22	12,8		A_1		Hs
45	Montbrun-Bocage			2,53	10,2		A_2	□	Hm
46				1,20	8,5		(B)	□	Hp

TABLEAU I (suite)

N°	Origine géographique	Cultures ou végétation naturelle	Fertilisation	M. o. % de sol	C/N	Type pédologique	Nat. des horizons	Signe (1) représentatif	Groupes (2)
47	Région toulousaine	Forêt de sapins	Sans fumure	29,90	22,3	Sol lessivé	A_0	△	Hs
48				11,4	19,8		A_1	△	Hs
49	Montbrun-Bocage			2,58	18,8		A_2		Hm
50				1,10	10,9		B	□	Hp
2417	Région des Landes	Forêt de pins (mise en cultures, maïs dep. 5 ans)	Fertilisation minérale et amendement calcaro-magnésien (dep. 5 ans)	4,11	26,0	Podzol humo-ferrugineux (3)	A_1 (+ A_0)	+	A_1Pz
2418				1,17	38,1		A_2		
2419	Cestas			6,43	20,3		B_1	⊖	B_1Pz
2420				1,58	18,0		B_2	⊕	B_2Pz
2421	Région des Vosges	Forêt de pins	Sans fumure	72,00	39,0	Podzol humo-ferrugineux	A_0	⊥	A_0Pz
2422				23,80	28,8		A_1	+	A_1Pz
2423				2,20	33,8		A_2		
2424				8,65	26,9		B_1	⊖	B_1Pz
2425	Taintrux			1,43	21,3		B_2	◒	B_2Pz
2427	Région des Landes	Forêt de pins	Sans fumure	29,15	27,9	Podzol humo-ferrugineux (3)	A_0	⊥	A_0Pz
2428				4,01	36,2		A_1	+	A_1Pz
2430				3,39	30,1		B_1	⊖	B_1Pz
2431	Cestas			0,86	21,7		B_2	◒	B_2Pz
2432	Région des Landes	Forêt de pins	Sans fumure	7,47	36,5	Podzol humo-ferrugineux (3)	A_1	+	A_1Pz
2434				2,13	29,4		B_1	⊖	B_1Pz
2435	Cestas			0,77	30,0		B'_1		
2436				0,59	28,3		B''_2	◒	B_2Pz
2437	Région des Landes	Molinie	Sans fumure	15,15	37,4	Podzol humo-ferrugineux (4)	A_0	⊥	A_0Pz
2438				1,94	29,8		A_1	+	A_1Pz
2439				2,20	30,2		B_1	⊖	B_1Pz
2440	Cestas			0,26	25,0		B_2	◒	B_2Pz

TABLEAU I (suite)

No	Origine géographique	Cultures ou végétation naturelle	Fertilisation	M. o. % de sol	C/N	Type pédologique	Nat. des horizons	Signe (1) représentatif	Groupes (1)
2441	Région des Landes	Molinie et bruyères	Sans fumure	10,57	20,9	Podzol humo-ferrugineux (4)	A_1	+	A_1Pz
2442				5,29	20,4		A_1	+	A_1Pz
2443				2,20	21,3		B_1	⊖	B_1Pz
2444				1,10	17,6		B'_1		
2445	Cestas			0,33	16,7		B_2	●	B_2Pz

(1) Signes représentatifs utilisés dans le diagramme de la figure 1.

(2) Les sols étudiés ont été répartis et réunis en groupes en fonction de leur origine géographique ou de leur fumure ; de même les horizons ont été classés en fonction de leur position et de la nature pédologique des profils.

SaFr : Sols arables de France
SaCn : Sols arables du Cameroun
SSF : Sols sans fumure issus de champs permanents de France
SSF (P + T) : Sols sans fumure issus de champs permanents du Bassin parisien ou de la Région toulousaine
SAE (P + T) : Sols avec engrais issus de champs permanents du Bassin parisien ou de la Région toulousaine
SAF (P + T) : Sols recevant du fumier de champs permanents du Bassin parisien ou de la région toulousaine
SAF : Sols recevant du fumier issus de champs permanents de France
Hs : Horizons de surface de sols non podzolisés
Hm : Horizons moyens de sols non podzolisés
Hp : Horizons profonds de sols non podzolisés
A_0Pz : Horizons organiques de surface des podzols
A_1Pz : Horizons éluviaux des podzols
B_1Pz : Horizons humiques d'accumulation des podzols
B_2Pz : Horizons ferrugineux d'accumulation des podzols.

(3) Podzol développé en lande sèche.

(4) Podzol développé en lande humide (5).

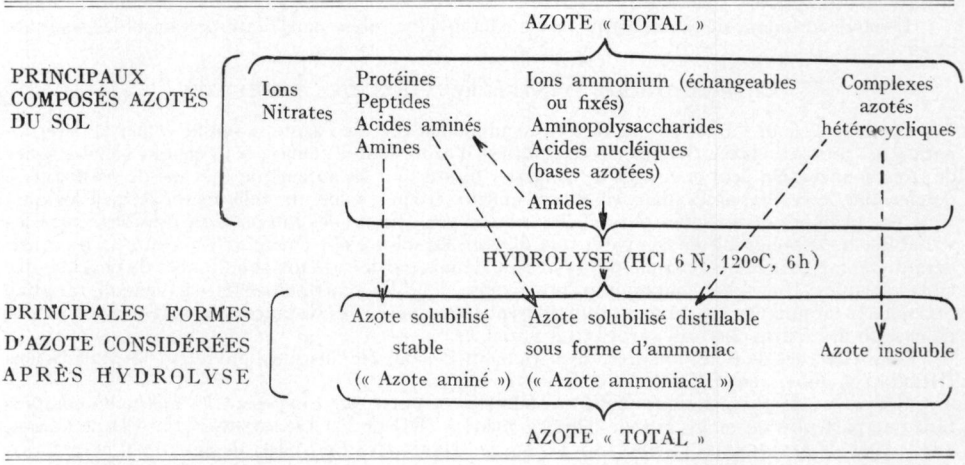
(5) N.-B. : Les conditions de drainage différentes des deux types de podzols n'ayant pas provoqué, dans la série des échantillons étudiés, de différences systématiques importantes dans la répartition de la matière organique, dans les rapports C/N ni, comme nous le verrons plus loin, dans la répartition des fractions azotées, nous avons groupé ensemble les horizons de même nature appartenant aux 2 types de podzols.

Étude critique des effets de l'hydrolyse

La diversité des milieux étudiés, diversité qui s'avère nécessaire dans un travail d'exploration comme celui que nous avons entrepris, nous a tout d'abord conduit à rechercher l'éventualité d'une différenciation artificielle des milieux, à la suite de l'hydrolyse.

TABLEAU 2

Fractionnement de l'azote du sol :
les principales formes d'azote obtenues après hydrolyse et leur provenance



La présence des constituants minéraux des sols, lors de l'hydrolyse de substances protéiques, modifie les effets de l'acide chlorhydrique en accentuant les processus de destruction des acides aminés.

TABLEAU 3

Répartition de l'azote d'un mélange d'acides aminés soumis à différentes conditions d'hydrolyse

Échantillons hydrolysés	Formes d'azote			
	N total	N des acides aminés	N ammoniacal	N insoluble
Acides aminés seuls.....	100,0	99,7	0,3	0,0
Acides aminés ajoutés à 1 g de sol (n° 47)	99,7	98,0	1,7	0,0
Acides aminés ajoutés à 1 g de sol (n° 47) calciné .	98,6	95,2	2,3	1,1
Acides aminés ajoutés à 10 g de sol (n° 34) ...	98,3	92,6	5,7	0,0
Acides aminés ajoutés à 10 g de sol (n° 34) calciné	98,5	97,3	0,7	0,5

Or, si dans tous les milieux que nous avons soumis à l'hydrolyse, la présence de matières minérales était constante, la masse de ces matières était inégale suivant les milieux (horizons organiques de surface, horizons « minéraux » profonds, etc.).

Nous avons donc étudié l'influence de masses différentes de matières minérales des sols, ainsi que l'influence de masses variables de l'ensemble des constituants des sols, sur les résultats de l'hydrolyse. Pour cela, un mélange synthétique d'acides aminés, renfermant tous les acides aminés dont la présence s'est avérée constante dans le sol, a été soumis à l'hydrolyse en l'absence de sol ou en présence de masses différentes d'un horizon très organique (n° 47) ou très minéral (n° 34) ou encore en présence des matières minérales de ces horizons.

La destruction des acides aminés, avec formation d'ammoniac, s'est en effet avérée plus importante (tabl. 3) en présence de l'horizon pauvre en matière organique qu'en présence de l'horizon de surface très humifère.

Il conviendra donc de tenir compte de cet effet de l'hydrolyse dans l'interprétation des résultats observés.

C. — Méthode d'interprétation des résultats

Par le dosage de l'azote aminé, de l'azote ammoniacal et de l'azote insoluble et par la détermination des proportions relatives de ces trois formes d'azote sont obtenues, pour chaque sol, des séries de trois données. On peut envisager de comparer tour à tour les valeurs de chacune de ces données, de chacune de ces variables, dans les divers milieux étudiés, mais une telle méthode, peu logique, n'est pas exempte de critiques puisqu'elle ne tient pas compte des interactions possibles entre les variables. Il est préférable de comparer tout d'abord les sols « globalement » c'est-à-dire en les considérant comme des entités, comme des systèmes, définis par les valeurs simultanées de chacune des trois variables. Une telle comparaison, qui intègre donc les écarts observés sur chaque variable, nécessite la mesure des « distances » qui séparent les milieux : ces distances dépendent évidemment de chacun des écarts observés sur les trois variables.

Pour effectuer de telles mesures, diverses méthodes ont été mises en œuvre par les statisticiens (Hiernaux, 1964, 1965 ; Kendall et Stuart, 1966).

Une revue de ces techniques nous a conduit à constater que s'opposent les méthodes comportant une part plus ou moins grande d'approximation (DD de Czekanowski, 1932 ; CD de Clark, 1952 ; C^2H de Heincke, Penrose, 1954 ; Δg de Hiernaux, 1965 ; D_{jk} de Kendall et Stuart, 1966) et la technique du D^2 de Mahalanobis (1936), qui demeure exempte de critique sur le plan théorique. Mais le calcul du D^2 de Mahalanobis n'est possible que sous certaines conditions : normalité de la distribution de chaque variable et de la distribution multivariée, linéarité de toutes les corrélations, écarts non significatifs entre les variances ainsi qu'entre les corrélations. De plus la mise en œuvre de cette technique nécessite de très longs calculs. Nous avons donc appliqué l'une des autres techniques ; nous avons choisi celle de Kendall et Stuart (1966) qui nous a paru la plus aisément applicable et la plus satisfaisante dans notre étude.

Dans cette technique, à chacune des n valeurs V_1, V_2 ... V_n d'une variable, classées par ordre croissant est attribué un rang (r) de 1 à n (pour la plus grande).

Pour chaque variable sont ensuite calculés les rapports $\frac{(r_j - r_k)^2}{\text{Var } r}$ où var r est la variance du rangement de 1 à n pour cette variable. La distance entre deux milieux j et k définis par p variables est :

$$D_{jk} = \sum_{1}^{p} \frac{(r_j - r_k)^2}{\text{var } r}$$

La substitution des écarts $r_j - r_k$ aux écarts $v_j - v_k$ modifie nécessairement les différences entre les valeurs d'une même variable mais elle rend comparables les écarts entre variables différentes : aux dispersions diverses des p variables est substituée une dispersion unique (de 1 à n) qui rend les D_{jk} comparables, ainsi que leurs composantes, quelles que soient leurs dispersions originelles.

Cette méthode présente aussi l'avantage d'être applicable quelle que soit la distribution de la variable ; en outre, les calculs qu'elle nécessite sont simples quoique nombreux (quand n et p sont grands).

III. — RÉSULTATS

L'analyse des sols dont nous venons d'indiquer ci-dessus (tabl. 1) quelques caractères, a permis, malgré le nombre relativement petit d'échantillons étudiés et l'interaction manifeste de certains caractères, de mettre en évidence l'influence du

TABLEAU 4

Influence des conditions climatiques, pédologiques et culturales sur les teneurs moyennes des sols en azote total et en azote aminé, ammoniacal ou insoluble

Facteur principal de différenciation	Groupes de sols	Teneur en azote pour mille de sol			
		N aminé	N ammoniacal	N insoluble	N total
Climat	Sols arables du Cameroun (SaCn)	1,48	1,29^{+++} (1)	0,35	3,12^{+}
	Sols arables de France (SaFr)	0,71	0,46	0,30	1,47
Fumure	Sols sans fumure (SSF)	0,50^{++}	0,37^{+}	0,24	1,11^{+}
	Sols recevant du fumier (SAF)	0,78	0,44	0,34	1,56
Profondeur	Sols non podzolisés : Horizons de surface (Hs)	1,82^{+++}	0,75^{+++}	0,42^{++}	2,99^{++}
	Horizons moyen (Hm)	0,57^{+++}	0,40^{++}	0,21	1,18^{+++}
	Horizons profondeur (Hp)	0,28	0,28	0,16	0,72
Profondeur	Podzols : Horizons A_1	0,90	0,30	0,57^{+}	1,77
	Horizons B_1	0,53	0,18	0,25^{++}	0,97
	Horizons B_2	0,14	0,05	0,05	0,24

(1) Écart significatif au seuil de 0,05 (+), de 0,02 (++) ou de 0,01 (+++).

climat, de la fumure, du type pédologique des sols et de la profondeur sur la répartition des principales formes d'azote.

Cette influence s'exerce simultanément sur la masse des différentes formes d'azote présentes dans le sol et sur leurs proportions relatives. Pour la clarté de notre exposé, nous dissocierons ces deux actions et considérerons successivement nos résultats sous leurs deux aspects : absolu et relatif.

A. — Teneur des sols en azote aminé, ammoniacal et insoluble

Dans les divers milieux étudiés, les teneurs des trois formes d'azote varient entre de très larges limites, comme le montrent les données du tableau 3. Cependant, ces teneurs varient régulièrement en fonction des conditions climatiques, pédologiques et culturales des sols, ainsi qu'en fonction de la profondeur des horizons ; il est ainsi possible, grâce aux échantillons étudiés, de dégager l'influence des paramètres climat, fumure et profondeur, comme le montrent les données moyennes réunies dans le tableau 4.

Les teneurs moyennes en azote aminé, ammoniacal et insoluble sont plus élevées dans les sols du Cameroun (Nyombé) que dans les sols de France, plus élevées également dans les sols fumés que dans les sols sans fumure ; l'influence de la profondeur, variable avec la nature pédologique des profils, apparaît aussi de façon très évidente ; dans les sols non podzolisés, les taux d'azote aminé, ammoniacal et insoluble diminuent constamment vers la profondeur ; dans les podzols, et notamment dans les podzols présentant un horizon A_2 bien individualisé (tabl. 1), l'horizon profond B_1 présente généralement des teneurs supérieures à celles de l'horizon éluvial sus-jacent (Jacquin, Juste et Dureau, 1965).

Ces diverses variations ne sauraient nous surprendre puisque l'azote aminé, l'azote ammoniacal et l'azote insoluble sont les composantes de l'azote total dont sont bien connues les variations en fonction des différents paramètres considérés (Jenny, 1928 ; Decau, Fioramonti, Malterre, 1962, ...).

Les données du tableau 4 montrent aussi que ces paramètres ont une action de même sens sur chacune des composantes de l'azote total.

Mais les variations des teneurs en azote aminé, ammoniacal ou insoluble ne sont pas « parallèles », ce que montre bien l'examen des proportions relatives des trois formes d'azote dosées.

B. — Proportions d'azote aminé, ammoniacal et insoluble

Nous avons groupé, sur la figure 1, les proportions des formes d'azote obtenues après hydrolyse dans les divers milieux analysés, à l'exception de ceux qui ne présentent pas des caractères très typiques, ce qui est le cas des horizons moyens des sols non podzolisés et celui des sols arables qui ne proviennent pas de champs permanents.

La dispersion des points sur le diagramme montre la variabilité, suivant les sols, des proportions d'azote aminé, ammoniacal et insoluble. Cette dispersion n'est pas régulière ; la plupart des milieux se groupent en cinq constellations relativement bien délimitées que nous avons de ce fait inscrites dans différents polygones.

Or, on voit sur le diagramme que les populations de sols inscrites dans ces poly-

gones sont homogènes, à quelques exceptions près, et présentent chacune un ou plusieurs caractères communs dominants : l'origine géographique (polygone ABCD), le type pédologique (LNOQ), le type pédologique et la position des horizons en profondeur (EFGH ; BJKC).

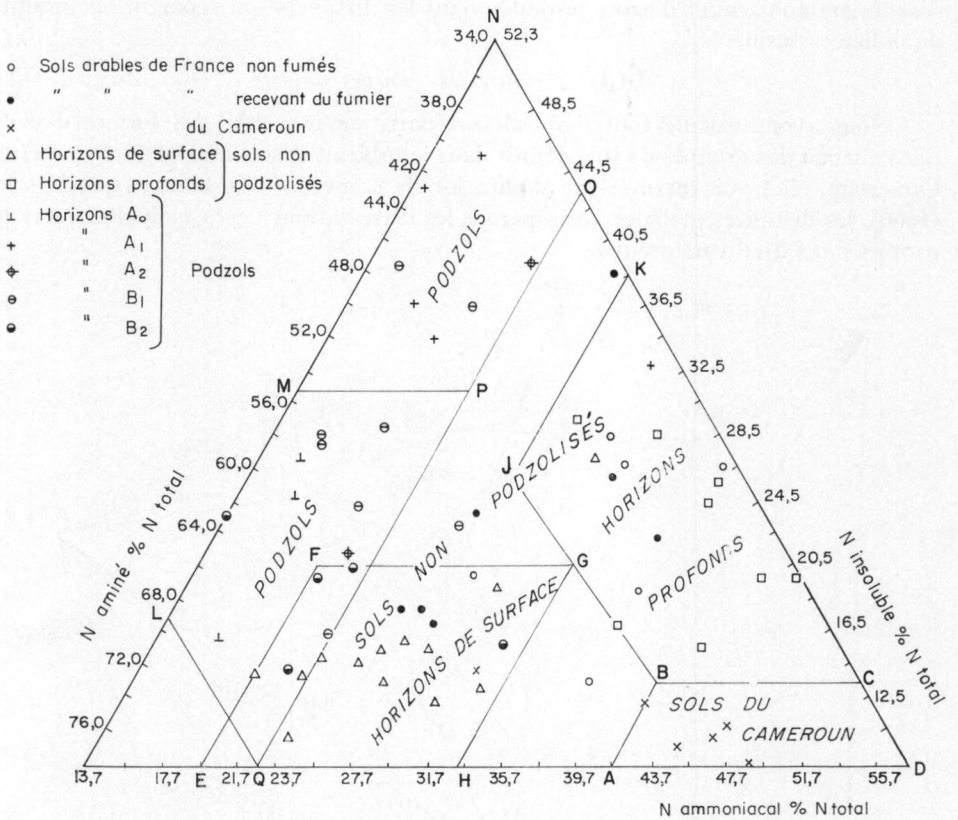


FIG. 1. — *Proportions d'azote aminé, ammoniacal et insoluble dans les principaux milieux soumis à l'hydrolyse*

Ainsi donc, ce bref examen du diagramme 1 met en lumière l'existence de groupes, de familles de sol, que réunissent, plus ou moins étroitement, un ou plusieurs caractères dominants (sols arables du Cameroun et de France, horizons de surface et horizons profonds des sols non podzolisés et des podzols).

La répartition des proportions d'azote aminé, ammoniacal et insoluble paraît ainsi dépendre de la provenance des sols, c'est-à-dire principalement des conditions climatiques qu'ils subissent, et, de plus, varier dans les profils avec la profondeur. Mais, la dispersion des milieux à l'intérieur des groupes n'autorise aucune conclusion nette de sorte que s'impose à nous la nécessité d'analyser de façon plus précise les résultats obtenus.

Dans ce but, nous avons tout d'abord cherché à mesurer les distances qui séparent les répartitions moyennes globales des formes d'azote dans les divers groupes

de sols analysés afin de les comparer et de mieux faire apparaître les écarts et les similitudes entre les milieux puis nous avons essayé de déterminer le degré de certitude qui s'attache aux écarts observés.

Ensuite, poussant plus avant l'analyse des résultats, nous avons cherché à préciser la part respective que prennent les différences de proportions d'azote aminé, d'azote ammoniacal et d'azote insoluble dans les distances qui séparent les groupes de milieux considérés.

1. *Distances entre les groupes de sols*

Nous avons calculé tout d'abord la répartition moyenne des formes d'azote dans chacun des groupes de sols définis dans le tableau 1 (sols arables de France, du Cameroun, etc.) puis mesuré, par application de la méthode de KENDALL et STUART (1966), les distances globales qui séparent les distributions des principales fractions azotées dans les divers groupes.

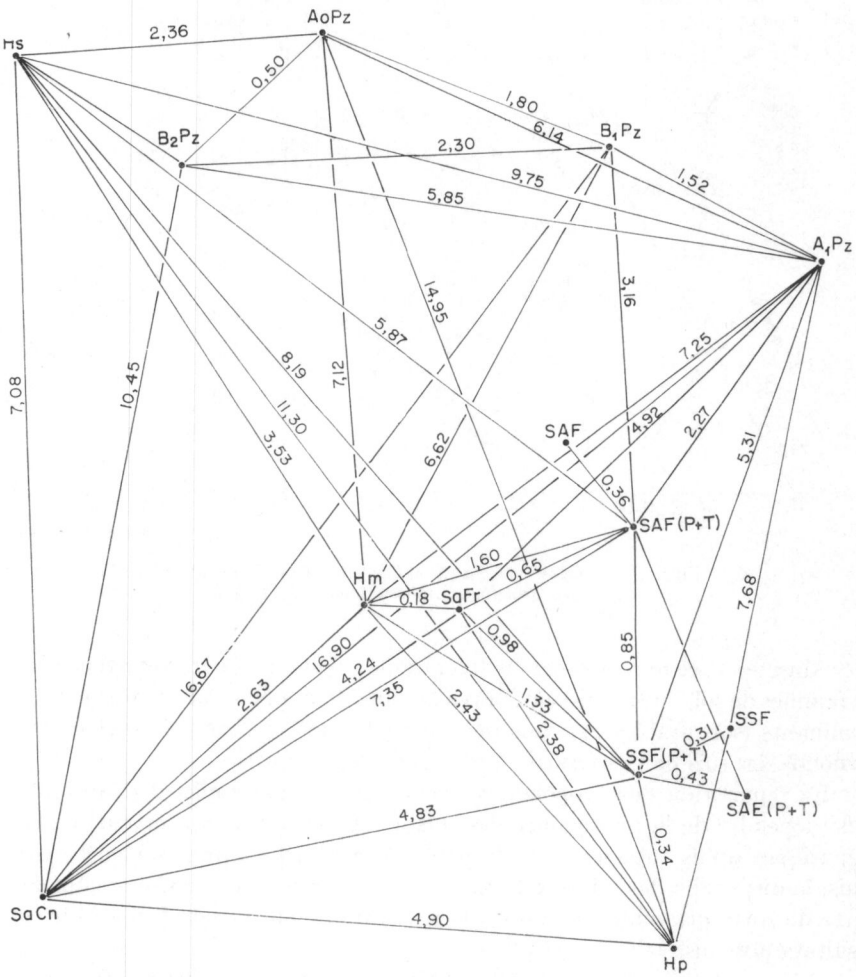


FIG. 2. — *Distances généralisées de* KENDALL *et* STUART *entre les différents groupes de sols étudiés*

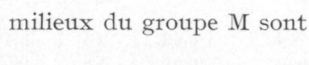
Grâce à ces mesures, réunies sur la figure 2, nous pouvons voir que les sols arables de France et leurs sous-groupes (sols sans fumure et sols fumés) ainsi que les horizons moyens et profonds des sols non podzolisés forment un « nuage » relativement dense autour duquel viennent se placer, fort éloignés de cet ensemble, les sols du Cameroun, les horizons de surface des divers profils et les horizons A et B des podzols.

En considérant les distances D_{jk} qui séparent les divers groupes, nous pouvons constater que la situation des horizons en profondeur, dans les sols non podzolisés (distance $D_{H_S} - {}_{H\rho} = 11{,}30$), la nature pédologique des profils ($D_{A_1P_Z} - {}_{H_S} = 9{,}75$), l'origine géographique ($D_{sacn} - S_{aFr} = 4{,}24$) et la fumure $D_{SSF\ (P\ +\ T)\ -\ SAF\ (P\ +\ T)} = 0{,}85$) se classent successivement par ordre décroissant d'efficacité dans la différenciation des proportions relatives d'azote aminé, ammoniacal et insoluble, la distance et l'efficacité les plus grandes apparaissant cependant lorsque se trouve conjuguée l'influence de plusieurs facteurs. Tel est le cas pour les horizons A_1 et B_1 des podzols d'une part, pour les sols d'Afrique d'autre part, qui diffèrent à la fois par les conditions climatiques auxquelles ils sont soumis mais aussi par leur texture et que sépare la distance maximale observée ($D_{A_1P_Z} - {}_{s_a c_n} = 16{,}90$).

La mesure des distances D_{jk} entre les moyennes des groupes permet donc de comparer les influences respectives des divers paramètres étudiés et d'obtenir ainsi d'intéressants résultats relatifs, mais elle ne suffit pas pour apprécier leur valeur statistique. Il convient dans ce but de tenir compte de la dispersion des milieux autour de leurs moyennes.

2. *Signification statistique des distances entre les groupes de sols*

Soient m_1, m_2, ... m_n les divers milieux d'un groupe dont la moyenne est M et soit M′ la moyenne d'un autre groupe. Nous avons calculé les distances m_1M, m_2M, ... m_nM et m_1M′, m_2M′$_1$, ... m_nM′ et cherché ensuite, en appliquant la méthode d'appariement (VESSEREAU, 1948), si ces deux populations de distances sont significativement distinctes.



S'il en est ainsi, les milieux du groupe M sont significativement distants de la moyenne du groupe M′.

L'application de ce calcul aux principales distances inter-groupes (ou inter-moyennes) a permis d'observer (tabl. 5) que, dans de nombreux cas, des seuils de signification très élevés sont atteints. Il en est ainsi en particulier lorsque les distances D_{jk} sont de l'ordre de 4 ou supérieures (tabl. 5).

Ceci nous permet donc de constater que les sols arables du Cameroun forment un groupe à part, très significativement distant des sols arables de France ainsi que des différents horizons des profils. Nous voyons, de même, que les horizons des profils sont, pour la plupart, significativement éloignés les uns des autres (distances Hp-Hs, A_1Pz-A_0Pz et A_1Pz-B_2Pz, supérieures à 4,24).

Lorsque les distances D_{jk} sont inférieures à 4, des écarts significatifs sont encore observés dans quelques cas mais, pour les distances les plus faibles, les différences cessent d'être significatives et l'on voit ainsi que les horizons A_1 des podzols ne diffèrent pas significativement des horizons B, et que, de même, les horizons B_2Pz, A_0Pz et Hs ne sont pas séparés par des distances significatives.

3. *Composantes des distances inter-groupes*

La distance D_{jk} qui sépare deux groupes de sols est la résultante de trois écarts composants élémentaires. On a :

$$D_{jk} = D_{Najk} + D_{NNH3jk} + D_{Ni \cdot jk}$$

Il est possible, en comparant les valeurs de ces trois grandeurs, de déterminer l'importance relative des écarts des proportions d'azote aminé, d'azote ammoniacal et d'azote insoluble. On peut aussi, en employant encore la méthode que nous avons appliquée aux distances généralisées D_{jk}, déterminer la probabilité qu'ont les écarts élémentaires d'être significatifs.

TABLEAU 5

Seuils de signification et composantes des distances généralisées inter-groupes

Distances	Distances généralisées inter-groupes		Distances élémentaires inter-groupes					
			N aminé		N ammoniacal		N insoluble	
	D_{jk}	Seuil de signification (SS)	DN_{ajk}	SS **	DN_{NH_3jk}	SS	DN_{ijk}	SS
SaCn — A_1Pz	16,90	0,01	0,14	NS*	7,36	0,01	9,40	0,01
SaCn — B_1Pz	16,67	0,01	0,71	NS	7,87	0,02	8,24	0,01
Hp — Hs	11,30	0,01	6,53	0,01	3,17	0,01	1,60	NS
A_1Pz — A_0Pz	6,14	0,01	4,63	0,01	0,05	NS	1,46	0,01
A_1Pz — B_2Pz	5,85	0,01	3,45	0,02	0,09	NS	2,31	0,01
SaCn — SaFr	4,24	0,01	0,08	NS	1,16	NS	3,00	0,01
Hp — Hm	2,43	0,02	1,81	0,01	0,25	NS	0,37	NS
B_2Pz — B_1Pz	2,30	0,05	0,41	NS	0,14	NS	1,75	0,05
A_1Pz — B_1Pz	1,52	NS (0,06)	1,48	NS (0,06)	0,00	NS	0,04	NS
B_2Pz — Hs	0,88	NS	0,00	NS	0,14	NS	0,74	NS
SSF(P+T) — SAF(P+T)	0,85	0,05	0,21	NS	0,55	NS (0,06)	0,09	NS
B_2Pz — A_0Pz	0,50	NS	0,09	NS	0,27	NS	0,14	NS
SSF(P+T) — SAE(P+T)	0,43	NS	0,18	NS	0,02	NS	0,23	NS

* NS : Écarts non significatifs.
** SS : Seuils de signification.

Ainsi, comme le montrent notamment les données du tableau 5, les sols du Cameroun et les horizons A_1 et B_1 des podzols, que séparent les distances généralisées les plus grandes, s'écartent significativement les uns des autres à la fois par leurs proportions d'azote ammoniacal et d'azote insoluble. Par contre, les sols du Cameroun diffèrent des sols de France essentiellement par leurs proportions plus faibles d'azote insoluble. Des écarts significatifs intéressant les proportions d'azote

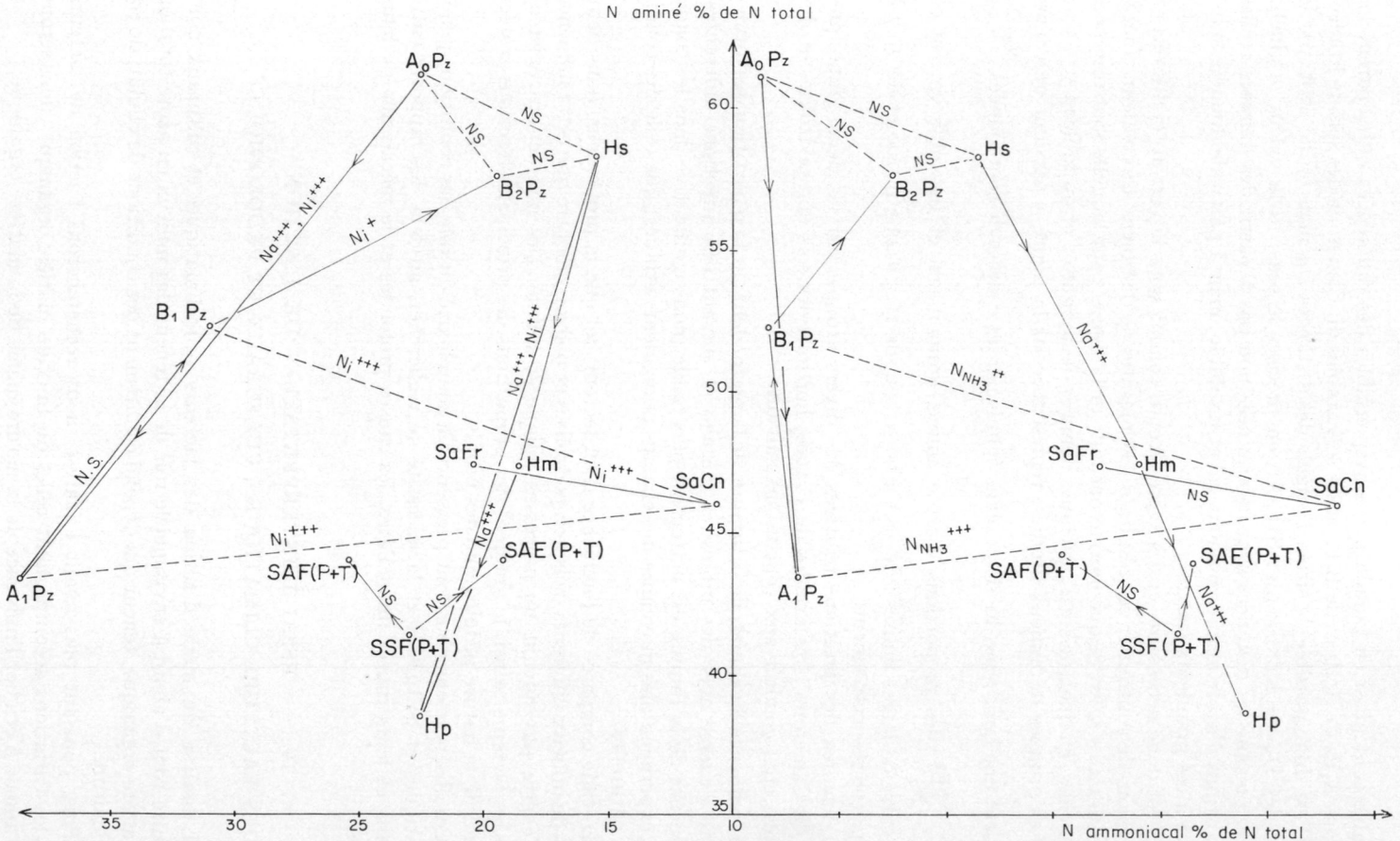


FIG. 3. — *Répartition comparée des proportions moyennes d'azote aminé, ammoniacal et insoluble dans les principaux groupes de sols*

insoluble sont aussi en grande partie responsables des différences qui séparent les horizons A_1Pz de A_0Pz et de B_2Pz et les sols arables du Cameroun des sols de France.

Il est donc possible de situer l'origine des distances D_{jk} mais on ne peut, par le calcul des D_{jk} de KENDALL et STUART, en préciser le sens, ni la valeur originelle exacte, puisque les distances sont déterminées non pas à partir des données réelles (proportions d'azote aminé, ammoniacal et insoluble) mais à partir de données substituées à ces grandeurs (rangs).

Il est donc nécessaire, et il s'avère fécond, comme nous le verrons ci-dessous en conclusion, de confronter ces résultats (ces mesures de distances) aux valeurs analytiques initiales. C'est ce que nous avons fait sur la figure 3 sur laquelle sont résumées et associées, en quelque sorte, quelques données de la figure 2 et du tableau 5.

Les groupes de milieux étudiés, représentés sur la figure 3 par leur moyenne, occupent une large zone des deux plans définis par les couples de coordonnées $\frac{N_a}{N_t}, \frac{N_i}{N_t}$ et $\frac{N_a}{N_t}, \frac{N_{NH_3}}{N_t}$: les proportions d'azote aminé, ammoniacal et insoluble varient en effet entre de larges limites ; de 38,5 à 60 p. 100, de 16,3 à 43,3 p. 100 et de 10,7 à 38,5 p. 100 respectivement.

L'examen des positions relatives des divers groupes sur les deux graphiques (sols du Cameroun, sols arables de France, horizons des sols non podzolisés et des podzols, etc.) conduit aux conclusions suivantes :

L'influence du climat, de la fumure, de la profondeur sur la répartition des formes d'azote s'exerce avec des intensités inégales et suivant des directions différentes. L'influence de la fumure est nettement plus faible (non significative dans les conditions expérimentales moyennes des champs permanents étudiés) que celle des conditions naturelles.

L'étude comparée de l'influence d'un facteur, tel que la profondeur, dans deux types de milieux différents (sols non podzolisés et podzols) montre que cette influence ne s'exerce pas suivant un processus unique et simple. Des interactions existent entre les facteurs : ainsi, le gradient des proportions des principales fractions azotées dépend de la nature pédologique des profils.

Ces observations nous font pressentir la complexité du rôle des conditions pédoclimatiques et culturales et la nécessité de rechercher, au-delà des rapports entre les faits et leurs causes immédiates, les causes profondes et le mécanisme de leurs actions.

IV. — ESSAI D'INTERPRÉTATION DE L'ACTION DES FACTEURS CLIMATIQUES, CULTURAUX ET PÉDOLOGIQUES

L'analyse du mode d'action des facteurs pédoclimatiques et culturaux nous conduira tout d'abord à envisager le rôle de la teneur des milieux en azote total ou en matière organique, teneur qui dépend étroitement des conditions de climat, de sol et de culture.

Puis, poussant plus avant l'analyse, nous rechercherons l'action de facteurs dont les variations accompagnent celles du taux de matière organique : nous serons ainsi amené à étudier l'influence de la nature même de la matière organique.

Par la suite, nous préciserons le rôle d'autres caractères des sols variant aussi, dans certains milieux étudiés, en même temps que le taux de matière organique : les caractères texturaux.

A. — Influence de la teneur des milieux en azote total

Maintes recherches ont montré l'action des facteurs pédoclimatiques et culturaux sur la teneur des sols en azote total (Jenny, 1928, 1965 ; Morel, Richer, Masson, 1956 ; Decau, Fioramonti, Malterre, 1962 ; etc). Nous avons donc été naturellement conduit à rechercher dans quelle mesure la répartition quantitative et relative des différentes formes d'azote est liée au taux d'azote total.

La dépendance des teneurs en azote aminé, ammoniacal et insoluble à l'égard de la teneur en azote total apparaît de prime abord comme évidente puisque l'on a :

$$N \text{ total } ‰ = N_a ‰ + N_{NH_3} ‰ + N_i ‰$$

Mais cette formule n'implique pas nécessairement l'existence de relations rigoureusement fonctionnelles entre N total et chacune des formes d'azote. Pour préciser ce point, dans le cas de l'azote aminé pris ici comme exemple, nous avons porté sur la figure 4 les teneurs des divers milieux en azote aminé en fonction de leur taux d'azote total.

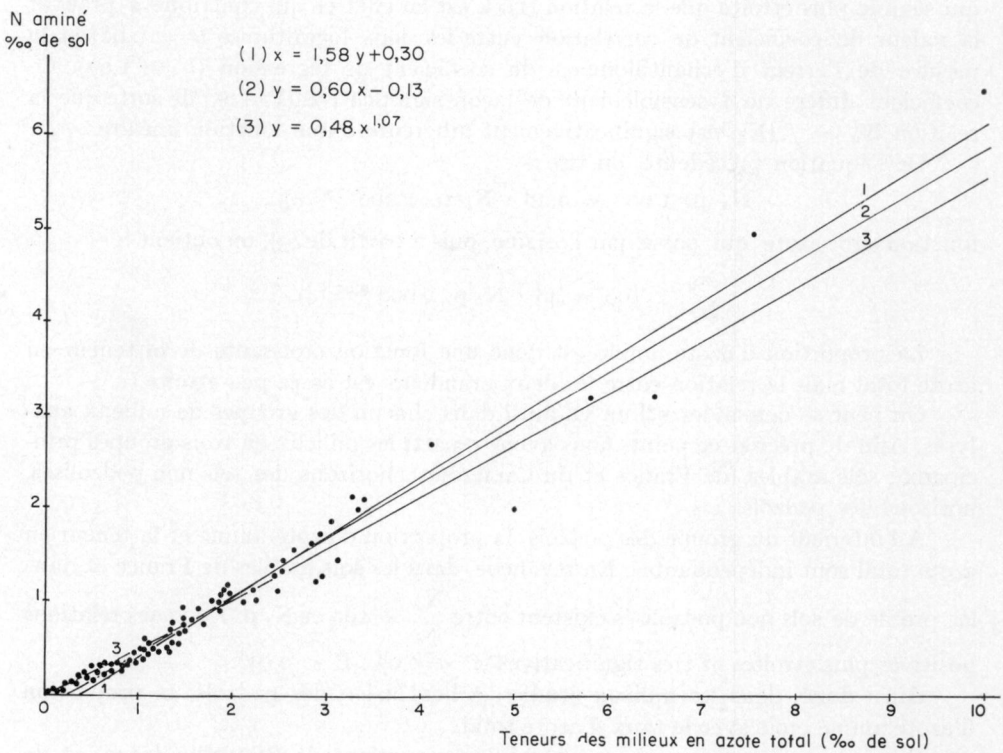


Fig. 4. — *Relation entre la teneur des milieux en azote aminé et leur taux d'azote total*

La position des milieux sur le graphique permet de considérer comme linéaire, en première approximation, la relation qui lie les deux coordonnées. Il est possible,

avec cette hypothèse, de calculer le coefficient de corrélation qui lie les deux grandeurs. Ce coefficient est très élevé (0,97) et hautement significatif ($P < 0{,}01$). Il existe donc une relation quasi fonctionnelle entre la teneur en azote aminé et le taux d'azote total, ce qu'illustrent aussi les faibles écarts entre les coefficients angulaires des droites de régression (1) et (2).

Des relations analogues, quoique moins étroites, lient aussi, en raison de la complémentarité des trois formes d'azote, les teneurs en azote ammoniacal et insoluble aux taux d'azote total.

On remarque, sur la figure 4, que les droites de régression $N_a = f(N_a)$ et $N_t = f(N_a)$ ne passent pas par l'origine ; toutefois les ordonnées à l'origine de ces deux courbes ne sont pas significativement différentes de zéro.

On peut cependant se demander, au vu de la répartition des points sur la figure 4, si la variation de N_a en fonction de N_t ne serait pas plus fidèlement représentée par une fonction de la forme $N_a = K \cdot N_t^n$ (avec $n < 1$) fonction qui passe par l'origine. Afin de répondre à cette question, nous avons cherché la forme de la relation qui lie les logarithmes des deux variables.

Il existe entre ces grandeurs une relation linéaire :

$$\log N_a \text{ p. } 1\,000 = 1{,}07 . \log N_t \text{ p. } 1\,000 - 0{,}31 \quad (2)$$

qui semble plus étroite que la relation (1). C'est en effet ce qui contribue à prouver la valeur du coefficient de corrélation entre les deux logarithmes ($r = 0{,}98$) et la mesure de l'erreur d'échantillonnage du coefficient de régression ($b = 1{,}07$). Ce coefficient diffère de 1 sensiblement de façon significative (P 0,05) de sorte que la relation $N_a = f(N_t)$ est significativement différente d'une fonction linéaire.

De l'équation précédente, on tire :

$$N_a \text{ p. } 1\,000 = 0{,}48 \cdot N_t \text{ p. } 1\,000^{\,1{,}07} \quad (3),$$

fonction croissante qui passe par l'origine, puis à partir de (3), on obtient :

$$\frac{N_a}{N_t} \times 100 = 48 \cdot N_t \text{ p. } 1\,000^{\,0{,}07} \quad (4).$$

La proportion d'azote aminé est donc une fonction croissante de la teneur en azote total mais la relation entre les deux grandeurs est assez peu étroite.

On peut se demander s'il en va ainsi dans chacun des groupes de milieux analysés. Afin de préciser ce point, nous avons réparti les milieux en trois groupes principaux : sols arables (de France et du Cameroun), horizons des sols non podzolisés, horizons des podzols.

A l'intérieur du groupe des podzols, la proportion d'azote aminé et la teneur en azote total sont indépendantes. En revanche, dans les sols arables de France et dans les profils de sols non podzolisés existent entre $\frac{N_a}{N_t} \times 100$ et N_t p. 1 000 des relations positives plus étroites et très significatives ($P < 0{,}05$; $P < 0{,}01$).

Ainsi donc, dans les milieux étudiés, à l'exclusion des podzols, la proportion d'azote aminé croît avec le taux d'azote total.

Ces faits peuvent être rapprochés des observations de BREMNER (1949) et de STEVENSON (1956 *a*, 1956 *b*) mais ils diffèrent des résultats de CHENG et VAN HOVE (1964) et de KEENEY et BREMNER (1964) qui ont noté des variations faibles et irrégulières de la proportion d'azote aminé avec la teneur en azote total.

Il convient par ailleurs de noter que de la teneur des milieux en cet élément dépend le taux de matière organique, de sorte que la relation observée entre les proportions des différentes fractions azotées et la teneur globale des sols en azote traduit en fait la relation entre la répartition des formes d'azote et le taux de matière organique ; ceci s'est trouvé confirmé en considérant les teneurs des milieux en carbone organique qui fournissent les mêmes indications.

Ainsi donc, les proportions d'azote aminé, ainsi d'ailleurs que les proportions d'azote ammoniacal et d'azote insoluble qui leur sont complémentaires, varient, dans les sols non podzolisés, suivant les teneurs des milieux en matière organique, teneurs que déterminent et que contrôlent les conditions climatiques et culturales et la position des horizons dans les profils.

Il convient maintenant de vérifier si ces variations résultent d'un rapport réel de cause à effet ou bien si la relation entre répartition des formes d'azote et taux de matière organique est seulement la conséquence fortuite d'une relation différente, causale, d'une relation entre degré d'humification et répartition de l'azote par exemple. La première de ces éventualités a été envisagée au début de notre travail (cf. techniques). Nous avons montré qu'à partir d'une même quantité d'acides aminés, des quantités légèrement différentes d'azote aminé sont obtenues selon que l'hydrolyse a lieu en présence d'un milieu riche en matière organique ou d'un milieu pauvre. Quand diminue le taux de matière organique, il en va de même de la quantité d'azote aminé récupérée, tandis que l'azote ammoniacal augmente.

Ce phénomène contribue à expliquer les variations des proportions d'azote aminé avec le taux d'azote total ou de matière organique mais l'amplitude de l'effet de destruction à l'hydrolyse demeure limitée et ne saurait rendre compte totalement des variations observées. Nous devons donc envisager la seconde éventualité.

B. — Influence de la nature de la matière organique

Une appréciation de la nature de la matière organique du sol, et plus particulièrement de son degré d'évolution, est obtenue par la mesure du rapport C/N.

1. *Formes d'azote et rapport C/N*

Si nous considérons les sols arables de France, nous voyons que les proportions d'azote aminé, ammoniacal et insoluble sont, dans ces milieux, indépendantes du rapport C/N : alors que ce rapport varie peu d'un milieu à l'autre, les proportions des trois formes d'azote présentent d'amples variations.

Dans les profils des podzols, en revanche, les rapports C/N sont plus largement distribués mais on n'observe pas cependant , ici encore, de relations entre la répartition des formes d'azote et le rapport C/N.

Dans les profils de sols non podzolisés, dont les C/N sont aussi très différents, il en va différemment et l'on peut voir (tabl. 6) que la proportion d'azote aminé augmente avec le C/N dans les horizons où ce rapport atteint des valeurs élevées : la proportion d'azote aminé est ici d'autant plus grande que la matière organique du sol est moins évoluée. Ainsi, pour la plupart des profils de la région toulousaine, on peut sans doute attribuer, au moins partiellement, à une plus grande humification de la matière organique des horizons profonds, la diminution de la proportion de l'azote aminé dans l'azote total. La présence d'une quantité relativement impor-

tante d'azote ammoniacal, dans les sols de Nyombé, vient appuyer le bien-fondé de ce mécanisme, la matière organique de ces sols ayant un haut degré d'humification (DUGAIN, 1960).

TABLEAU 6

Répartition de l'azote et degré d'humification de la matière organique dans les sols non podzolisés

Rapport C/N des profils	Proportions moyennes des formes d'azote pour cent de l'azote total		
	N aminé	N ammoniacal	N insoluble
C/N ≤ 10,0	+ 44,5	++ 35,1	20,4
10,0 < C/N ≤ 12,5	46,9	33,9	19,2
12,5 < C/N ≤ 15,0	49,9	34,1 +	16,0
15,0 < C/N ≤ 25,0	58,9	25,3	15,8

Afin de vérifier ces faits et leur interprétation, dans divers horizons de sols non podzolisés, nous avons fractionné la matière organique.

2. *Formes d'azote et proportions de matière organique libre ou liée*

Nous avons séparé matière organique libre et matière organique liée au moyen de liquide de densité 2,0 (MONNIER, TURC et JEANSON-LUUSINANG, 1962) dans divers horizons (A_0 et A d'une part, (B) et Bg d'autre part) de sols bruns et de sols lessivés.

Il ressort de la comparaison des fractions organiques (tabl. 7) que l'azote aminé occupe dans l'azote total une place plus importante et l'azote ammoniacal une place plus modeste, dans la matière organique libre que dans la fraction à la fois humique et minérale du sol.

TABLEAU 7

Proportions moyennes des principales formes d'azote dans les matières organiques libres ou liées des sols non podzolisés (1)

Nature de l'échantillon	Proportions des formes d'azote pour cent d'azote total		
	N aminé	N ammoniacal	N insoluble
Matière organique libre ...	55,7 NS	27,1 ++	17,2
Matière organique liée	47,2 (2)	33,7	19,1

(1) Horizons fractionnés : n° 20, 23, 43, 46, 47, 50.
(2) Écart non significatif mais probabilité supérieure à 0,92.

Ces résultats suggèrent le corollaire suivant : la diminution de la proportion d'azote aminé vers la profondeur, compensée par l'augmentation de l'azote ammo-

niacal, résulte de l'abaissement en profondeur de la proportion de matière organique libre peu humifiée riche en azote aminé au profit de la matière organique humifiée dans laquelle domine l'azote ammoniacal ; ce fait est suggéré par la diminution, vers la profondeur, du rapport C/N.

Effectivement, les horizons superficiels et les horizons profonds diffèrent par la répartition de la matière organique entre les deux fractions : tandis que dans les horizons superficiels domine — plus ou moins nettement — la fraction organique libre (tabl. 8), dans les horizons profonds, la fraction organique liée est dans chaque cas beaucoup plus abondante.

TABLEAU 8

Proportions de matière organique libre ou liée dans quelques horizons des sols non podzolisés

Horizons	Hs			Hp		
N°	20	43	47	23	46	50
Rapport pondéral : fraction organique libre / fraction organique liée	1,29	1,17	8,92	0,51	0,42	0,43

Mais ces différences de proportions de matière organique libre et de matière organique liée ne paraissent jouer un rôle que dans les profils et dans les horizons relativement homogènes. En effet, ainsi que nous l'avons indiqué plus haut, de nombreuses variations de proportions des fractions azotées (cas des podzols notamment) paraissent indépendantes du degré d'humification de la matière organique.

Les résultats différents fournis par les sols non podzolisés et par les podzols pourraient résulter des différences fondamentales de texture qui séparent ces types de sol.

C. — Influence de la texture des milieux

Parmi les milieux étudiés, les podzols occupent, par leur texture, une position très particulière et forment un groupe homogène caractérisé par l'absence d'argile et la rareté des limons (texture sableuse). Aux podzols s'opposent les divers autres milieux qui renferment tous, à des taux variables il est vrai, des colloïdes minéraux.

On peut tenter de rechercher dans ces différences texturales l'origine des écarts notés entre les proportions d'azote aminé, ammoniacal et insoluble (cf. fig. 4) dans les deux grands types de milieux.

Dans ce but, nous avons étudié l'influence des colloïdes argileux sur la répartition des formes d'azote du sol.

Nous avons signalé plus haut (cf. techniques analytiques) que la présence des constituants minéraux des sols, et donc notamment des constituants colloïdaux et de leurs ions associés, provoque la formation d'ammoniac à partir des acides aminés, au cours de l'hydrolyse. Nous avons montré également ici que les colloïdes argileux

interviennent aussi, *in situ*, par leur pouvoir de rétention de l'azote ammoniacal sous forme échangeable et aussi, le plus souvent, sous forme rétrogradée (tabl. 9).

TABLEAU 9

Origine de l'azote ammoniacal des hydrolysats : teneur en azote ammoniacal échangeable ou fixé de quelques horizons de sols non podzolisés

Provenance des sols	N° des échantillons	Teneurs en azote pour mille de sol					Teneurs en argile pour cent de sol
		N ammoniacal (avant hydrolyse)			N de l'hydrolysat		
		échangeable	fixé (rétrogr.)	total	ammoniacal	total	
Forêt de Bouconne	20.....	0,10	0,02	0,12	0,76	3,02	14,4
	21.....	0,09	0,01	0,10	0,52	1,46	14,7
	22.....	0,08	0,05	0,11	0,45	1,10	20,4
	23.....	0,08	0,03	0,11	0,46	1,08	20,6
	24.....	0,05	0,08	0,13	0,22	0,50	25,5
Prairie de Montbrun-Bocage	43.....	0,08	0,14	0,22	0,97	4,11	—
	44.....	0,01	0,18	0,19	0,90	2,96	22,1
	45.....	0,01	0,15	0,16	0,64	1,44	20,2
Forêt de Montbrun-Bocage	47.....	0,03	0,16	0,19	1,49	7,53	—
	48.....	0,01	0,20	0,21	0,75	3,33	16,3
	49.....	0,02	0,18	0,20	0,26	0,80	21,4
	50	0,02	0,18	0,20	0,20	0,59	26,0

Les données ci-dessus (colonnes 2, 3 et 4) montrent en particulier que les ions ammonium rétrogradés fournissent une part variable mais parfois importante de l'azote ammoniacal des hydrolysats. Cette fraction croît vers la profondeur en même temps que le taux d'argile. Il est donc logique que, par suite de l'absence de cette source d'azote, les hydrolysats des podzols, milieux dépourvus d'argiles, renferment moins d'azote ammoniacal que ceux qui proviennent de sols non podzolisés.

La différence de texture est probablement aussi la cause principale des écarts observés entre les proportions moyennes d'azote insoluble dans ces deux types de sols.

En milieu de texture sableuse et sous climat humide, les phénomènes de lessivage jouent un très grand rôle dans la répartition de la matière organique des profils, comme en témoigne l'accumulation de la matière organique dans l'horizon B_1 des podzols (tabl. 1). Il nous a paru probable que ce lessivage affecte inégalement les divers constituants organiques azotés des végétaux et des sols et que soient préférentiellement entraînés les composés riches en azote solubilisable à l'hydrolyse. Ainsi pourrait se trouver explique le gradient d'azote insoluble observée entre les horizons A_1 et B_2 des podzols (fig. 4).

Nous avons testé cette hypothèse. Utilisant la technique et les conditions expérimentales qui ont permis à PEDRO (1964) de créer *in vitro* des conditions rapides de podzolisation, nous avons soumis plusieurs horizons organiques de surface (litière

d'aiguilles de pins et horizon organique humifié sous-jacent, notamment) à une percolation cyclique avec une solution acétique dans un appareil de Soxhlet.

TABLEAU 10

Répartition des principales formes d'azote dans les fractions solubles ou insolubles d'horizons organiques de surface soumis à une percolation acétique

Échantillons		Principales fractions azotées pour cent d'azote total		
		N aminé	N ammoniacal	N insoluble
D 1342 (1)	Résidu	49,1	13,5	37,4
	Percolat	70,2	13,5	16,3
D 1343 (2)	Résidu	41,2	15,5	43,3
	Percolat	66,7	22,8	10,5

(1) D 1342 : Litière d'aiguilles de pins.
(2) D 1343 : Matière organique sous-jacente.

Nous avons effectivement noté (tabl. 10) une accumulation relative d'azote insoluble à l'hydrolyse dans le résidu fixe soumis à la percolation, résidu qui joue ici le rôle de l'horizon A_1 des podzols. Ces observations viennent donc confirmer l'hypothèse du lessivage préférentiel des composés riches en azote solubilisable à l'hydrolyse au détriment des composés renfermant surtout de l'azote insoluble. A ce lessivage participeraient les acides organiques présents ou produits dans les litières au cours de l'humification.

Cependant, ce mécanisme n'exclut pas la participation d'autres phénomènes à l'accumulation d'azote insoluble dans les horizons des podzols.

Il se peut que l'acidité du milieu, sa pauvreté en bases échangeables, la pauvreté en azote des résidus organiques soient aussi en partie responsables de la formation d'un humus riche en azote insoluble. Nous nous proposons, dans une phase ultérieure de notre travail, de tester cette hypothèse qui sera d'ailleurs reprise et discutée plus loin, dans la suite de ce mémoire.

Des différences de proportions relatives d'azote insoluble et d'azote ammoniacal distinguent aussi les sols arables du Cameroun des sols arables de France.

L'origine de ces écarts ne réside pas ici dans des différences de la composition granulométrique, telle du moins que celle-ci est obtenue par l'analyse physique mais il se peut que la distribution particulière des formes d'azote des sols d'Afrique soit liée à certaines propriétés particulières de la fraction minérale, propriétés qui n'apparaissent pas dans une analyse immédiate. On peut notamment se demander dans quelle mesure la proportion importante d'azote ammoniacal obtenue après hydrolyse dépend des propriétés particulières des colloïdes minéraux de ces sols.

Les sols de Mbanga et de Nyombé différant surtout des sols arables français par leur proportion plus grande d'azote ammoniacal, nous avons cherché l'origine de

cette forme d'azote ; nous avons dosé les sucres aminés et les ions ammonium échangeables et fixés qui se trouvent originellement dans le sol.

Nous avons constaté que l'azote ammoniacal représente seulement le vingtième en moyenne de l'azote total ; la plus grande partie se trouve à l'état échangeable, les complexes ferralitiques de ces sols ne pouvant retenir, comme le font certaines argiles des sols de France, une quantité notable d'azote sous forme non échangeable.

Par contre, l'azote des sucres aminés est plus abondant et représente un huitième de l'azote total contre un quinzième environ seulement dans les sols de France.

Cependant, plus de la moitié de l'azote dosé sous forme ammoniacale ne provient pas de ces différents composés.

Il est probable qu'une importante fraction de l'azote ammoniacal libéré par hydrolyse provient de matières humiques : celles-ci ont vis-à-vis de l'azote ammoniacal un grand pouvoir de fixation (MATTSON et KOUTLER-ANDERSON, 1963 ; YOUNG, 1964) et sont très abondantes dans les sols camerounais étudiés (DUGAIN, 1960).

Les colloïdes minéraux interviendraient seulement d'une manière indirecte dans ce phénomène, en protégeant contre une rapide dégradation microbienne, les matières humiques formées.

L'origine du faible taux d'azote insoluble dans les sols du Cameroun peut aussi être recherchée dans l'humification très avancée de leur matière organique. Mais notre ignorance de la nature exacte et de l'état de cet azote dans le sol rend difficile tout éclaircissement dans ce domaine. Néanmoins, divers résultats peuvent, semble-t-il, éclairer nos observations. Tels sont les travaux de FLAIG (1963) qui, étudiant la transformation de « fractions de lignine » pendant la décomposition des matériaux des plantes, a montré que ces fractions, ainsi que l'insoluble à l'hydrolyse, s'enrichissent en azote et que, de plus, la proportion d'azote de la lignine demeurant insoluble à l'hydrolyse allait croissant au cours de la décomposition de la paille pour atteindre 25 p. 100 de l'azote total après 340 jours. Mais cet auteur a aussi montré que dans des acides humiques extraits de la même paille incubée, la proportion d'azote insoluble à l'hydrolyse est très inférieure à celle des fractions de lignine.

Ces observations nous conduisent à penser que le degré plus ou moins avancé de l'humification et les conditions mêmes de ce processus pourraient être les causes, au moins partielles, à la fois du très faible pourcentage d'azote insoluble des sols africains étudiés (dans lesquels le taux d'humification est très élevé) et des proportions élevées d'azote insoluble dans les podzols. Dans le premier cas, l'humus porte l'empreinte profonde d'une intense activité microbienne (ce que nous montrerons dans un second mémoire, grâce à l'étude de la répartition des acides aminés). Sous l'effet des microorganismes, il est probable que la lignine subit une dégradation avancée et perd ses caractères propres avant de participer à la synthèse des acides humiques. Dans le second type de milieux, les conditions sont moins favorables à la vie microbienne et les résidus végétaux sont moins fermentescibles. Il se peut donc que demeurent dans l'humus des podzols des « fractions de lignine » riches en azote insoluble.

V. — CONCLUSIONS

Ces observations et ces hypothèses montrent ici encore, si besoin était, que de nombreuses études expérimentales systématiques et approfondies sont nécessaires

afin de déterminer ou de préciser l'influence des conditions d'humification sur la répartition et le métabolisme des principales formes d'azote du sol.

Les diverses données réunies dans ce mémoire montrent que la répartition des formes d'azote obtenues par hydrolyse est la résultante complexe de composantes nombreuses et variables. Il apparaît cependant que le climat, la nature des milieux et les conditions culturales sont des facteurs effectifs de la répartition, tant en valeur absolue que relative, des formes de l'azote dans le sol.

L'influence de ces facteurs sur les teneurs en azote aminé, ammoniacal et insoluble, est illustrée notamment par les taux beaucoup plus élevés de l'azote aminé dans les sols du Cameroun (1,48 p. 1 000) que dans les sols de France (0,71 p. 1 000), dans les sols recevant des amendements organiques (0,78 p. 1 000) que dans les sols depuis de nombreuses années sans fumure (0,50 p. 1 000), dans les horizons de surface des sols non podzolisés comparés aux horizons profonds.

L'action des conditions pédoclimatiques et culturales n'apparaît pas moins nettement quand on compare, par exemple, les proportions d'azote ammoniacal des sols fumés à celles des sols sans fumure (30,3 et 35,8 p. 100), les proportions d'azote insoluble des sols de France à celles des sols du Cameroun (20,5 et 10,7 p. 100) ou les gradients des diverses formes d'azote, suivant la profondeur, dans des profils de nature pédologique différente.

L'étude statistique de ces divers écarts montre qu'ils ne sont très généralement pas dus au hasard mais reflètent bien des conditions écologiques différentes.

L'analyse des mécanismes par lesquels ces conditions de milieu interviennent met en lumière les faits suivants :

1. les gradients des proportions relatives d'azote aminé, ammoniacal et insoluble des profils de sols non podzolisés en fonction de la profondeur sont en partie dus :

a) au degré plus avancé de l'humification dans les horizons profonds comparés aux horizons de surface;

b) à la présence initiale, dans ces milieux, d'azote ammoniacal rétrogradé, en proportion plus grande dans les sous-sols que dans les sols;

c) à la destruction plus grande des acides aminés par l'agent d'hydrolyse dans les milieux pauvres en matière organique par rapport aux milieux riches ;

2. les gradients des proportions relatives d'azote aminé, ammoniacal et insoluble dans les podzols relèvent pour une large part d'un lessivage préférentiel des composés azotés riches en azote soluble au détriment de ceux qui renferment de l'azote insoluble, mais les conditions d'humification peuvent être aussi, comme le lessivage, responsables de l'accumulation relative d'azote insoluble dans les horizons A_1 et B_1 de ces sols ;

3. la répartition inégale des principales fractions azotées, dans les sols arables fumés ou non fumés d'une part, dans les sols arables de France ou du Cameroun d'autre part, résulte, dans une large mesure, des différences d'évolution des matières organiques dans ces divers milieux.

La répartition des principales fractions azotées est donc, suivant les milieux, sous la dépendance plus ou moins directe de processus physiques (lessivage préférentiel des podzols), physico-chimiques (rétrogradation des ions ammonium) et bio-

logiques (vitesses relatives d'organisation de l'azote par les plantes et les microorganismes, d'humification et de minéralisation).

Cette analyse des mécanismes par lesquels les conditions pédoclimatiques règlent la répartition des principales fractions azotées du sol fait apparaître la nécessité d'études nouvelles afin de mieux préciser l'influence des conditions de milieu sur le devenir de l'azote au cours des processus de l'humification.

Reçu pour publication en juillet 1968.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier tout particulièrement ici le Révérend Père CARLES, Directeur scientifique au Centre national de la Recherche scientifique, qui a bien voulu nous faire bénéficier, tout au long de ce travail, de sa grande expérience et de ses conseils, MM. les Professeurs CHAMPAGNAT et LOISEAU, de l'Université de Clermont-Ferrand, et MM. COLLIER et MOSSÉ, Directeurs de Recherche à l'I. N. R. A., qui ont bien voulu s'intéresser à ce travail et ont accepté de le juger.

Nous adressons aissi nos vifs remerciements à MM. BOISCHOT, DROUINEAU, GADET, GODEFROY, JACQUIN, JEANTEUR, JUSTE, LECOCQ, MOREL et SOUBIES qui nous ont fait parvenir une grande partie des échantillons de sols étudiés et nous ont fourni de précieuses données pédoclimatiques et culturales.

SUMMARY

CONTRIBUTION TO THE STUDY ON THE EFFECTS OF ENVIRONMENTAL CONDITIONS ON THE SOIL'S NITROGEN DISTRIBUTION

I. — MAIN FORMS OF NITROGEN DERIVED THROUGH HYDROLYSIS

92 soils or horizons from various areas of France and of the Cameroons, differing by their textural, pedological or cultural conditions, have been subjected to hydrochloric hydrolysis. The distribution of the main nitrogen forms so derived (amino-, ammonia and insoluble nitrogen) has been investigated in relation with cultural and pedo-climatic conditions.

The climatic conditions undergone by the soils (of France and of the Cameroons), the position of horizons in the profiles, as well as the pedological nature of the environments and cultural methods, have determined the distribution of the main nitrogenous fractions of the soils. In those in a subequatorial climate, the proportion of ammonia nitrogen is larger, $\frac{N_{NH_3}}{N_t} \times 100 = 43.3$, and the percentage of insoluble nitrogen $\left(\frac{N_i}{N_t} \times 100 = 10.7\right)$ lower, than in soils in a temperate climate $\left(\frac{N_{NH_3}}{N_t} \times 100 = 32.2, \frac{N_i}{N_t} \times 100 = 20.5\right)$.

Likewise, in unmanured soils, the proportion of ammonia nitrogen is larger (35.8 per cent) than in those manured, (30.3 per cent). In non-podzolized soil profiles, the percentage of amino-nitrogen decreases with depth, gradient which makes good the inverse variation of ammonia nitrogen. Contrariwise, in podzols, the proportion of amino-nitrogen rises with depth whilst the percentage of insoluble nitrogen diminishes.

The cause of these various observations has been sought. Variational nitrogen and organic-matter contents, different types of humus and texture of the soils are the chief causes of the deviations noted in the distribution of their major forms of nitrogen.

ZUSAMMENFASSUNG

BEITRAG ZUR UNTERDUCHUNG DES EINFLUSSES DER MILIEUBEDINGUNGEN AUF DIE VERTEILUNG DES BODENSTICKSTOFFES

I. — HAUPTSACHLICHE MITTELS HYDROLYSE ERHALTENE FORMEN DES STICKSTOFFS

92 aus verschiedenen Gebieten Frankreichs oder Kameruns stammende Böden oder Horizonte, die durch ihre Textur- oder ihre pedologischen Merkmale, oder durch ihre Kulturbedingungen voneinander abwichen, wurden der Salzsäure-Hydrolyse unterworfen. Die Verteilung der so erhaltenen hauptsächlichen Stickstoffformen (Amino-Stickstoff, ammoniakalischer und unlöslicher Stickstoff) wurde in Verbindung mit den pedoklimatischen und landwirtschaftlichen Bedingungen untersucht.

Die klimatischen Bedingungen, denen die Böden in Frankreich und in Kamerun ausgesetzt sind, die Lage der Horizonte in den Bodenprofilen als auch die pedologische Natur der Milieus und ihrer landwirtschaftlichen Nutzung bestimmen die Verteilung der hauptsächlichen stickstoffhaltigen Fraktionen der Böden. Bei den einem unteräquatorialen Klima ausgesetzten Böden, ist der Anteil an ammoniakalischen Stickstoff grösser $\left(\frac{N_{NH_3}}{N_t} \times 100 = 43{,}5\right)$ und der Prozentsatz an unlöslichem Stickstoff schwächer $\left(\frac{N_i}{N_t} \times 100 = 10{,}7\right)$ als in den einem gemässigteren Klima ausgesetzten Böden $\left(\frac{N_{NH_3}}{N_t} \times 100 = 32{,}2, \frac{N_i}{N_t} \times 100 = 20{,}5\right)$.

Ebenso ist in Böden ohne Dünger der Anteil an ammoniakalischen Stickstoff grösser (35,8 p. 100 als in den gedüngten Böden (30,3 p. 100). In den nichtpodzolierten Bodenprofilen, wird ein abnehmender Gradient des Prozentsatzes an Amino-Stickstoff mit zunehmender Tiefe festgestellt. Dieser Gradient wird durch eine umgekehrte Aenderung des ammoniakalischen Stickstoffgehaltes ausgeglichen. In den Podzolen, wächst, im Gegenteil, der Anteil an Amino-Stickstoff mit der Tiefe, während der Prozentsatz an unlöslichem Stickstoff abnimmt.

Die Ursachen dieser verschiedenen Beobachtungen wurden untersucht. Gehaltsunterschiede der Milieus an Stickstoff und an organischer Materie, sowie die Natur des Humus und die Textur der Böden sind die Hauptursachen der beobachteten Unterschiede in der Verteilung der hauptsächlichen Formen des Stickstoffes.

РЕЗЮМЕ

К изучению влияния условий среды на распределение азота почв.

I. Главные формы азота полученные с помощью гидролиза.

Ж. ДЭКО.

92 образца почв и горизонтов различных областей Франции и Камеруна, различающихся по характеру их механического состава и по способам окультуривания, были подвержены солянокислому гидролизу. Распределение главных полученных форм азота (аминная, аммониачная и нерастворимая формы) было изученно в связи с педологическо-климатическими условиями, а также и с условиями культуры.

Климатические условия в которых находятся данные почвы (почвы Франции, почвы Камеруна), расположение горизонтов в профилях, педологическая природа среды и способы окультуривания обуславливают распределение главных фракций азота почв. В почвах субэкваториального климата пропорция аммониачного азота более велика $\left(\frac{N_{NH_3}}{Nr} \times 100 = 43{,}3\right)$ а процент нерастворимого азота — более низок $\left(\frac{Ni}{Nt} \times 100 = 10{,}7\right)$

чем в почвах умеренного климатического пояса $\left(\frac{N_{NH_3}}{Nt} \times 100 = 32{,}2;\right.$ $\left.\frac{Ni}{Nt} \times 100 = 20{,}5\right)$; процент аммониачного азота неудобренных почв, также превышает тот-же процент удобренных почв (35,8 % и 30,3 %); в профилях неоподзоленных почв, с увеличением глубины, отмечается уменьшение градиента пропорции аминного азота; это возмещается обратной тенденцией аммониачного азота; в подзолистых почвах — напротив, пропорция аминного азота увеличивается по мере увеличения глубины, в то время как пропорция нерастворимого азота — уменьшается.

Автор исследовал происхождение наблюдавшегося явления и пришел к заключению что различия в содержании азота и органического вещества в среде, также как и в природе гумуса и механического состава почв, являются главными причинами наблюдавшихся разниц в распределении в них главных форм азота.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BREMNER J. M., 1949. Studies on soil organic matter. I. The chemical nature of soil organic nitrogen. *J. Agric. Sci.*, **39**, 183-193.

BREMNER J. M., 1950. The amino-acid composition of the protein material in soil. *Biochem J.*, **47**, 538-542.

CHENG H. H., VAN HOVE J., 1964. Characterization of organic matter in European soils by nitrogen fractionation. *Pédologie*, **14** (1), 8-23.

CLARK P. J., 1952. An extension of the coefficient of divergence for use with multiple characters. *Copeia*, 61-64.

CZEKANOWSKI J., 1932. Coefficient of racial likeness und Durchschnittliche Differenz. *Anthropologischer Anzeiget Jahrgang*, **9**, 227-249.

DECAU J., FIORAMONTI S., MALTERRE H., 1962. Teneurs des sols de la Haute-Garonne en matières organiques. *Ann. agron.*, **13** (4), 347-362.

DHARIWAL A. P. S., STEVENSON F. J., 1958. Determination of fixed ammonium in soils. *Soil Sci.*, **86**, 343-349.

DROUINEAU G., LEFEVRE G., 1949. Première contribution à l'étude de l'azote minéralisable dans les sols. *Ann. agron.*, **19**, 518-536.

DUCHAUFOUR Ph., 1960. *Précis de Pédologie*. Masson et Cie, éd.

DUGAIN F., 1960. Étude sur la fertilité des sols de la plaine bananière du Cameroun. *Fruits*, **15**, nº 4, 153-170.

FLAIG W., 1963. The chemistry of humic substances. Symp. *The use of isotopes in soil organic matter studies*, p. 103-127.

HIERNAUX J., 1964. La mesure de la différence morphologique entre populations pour un ensemble de variables. *L'anthropologie*, **68**, 5-6, 559-567.

HIERNAUX J., 1965. Une nouvelle mesure de distance anthropologique entre populations utilisant simultanément des fréquences génétiques, des pourcentages de traits descriptifs et des moyens métriques. *C. R. Acad. Sci.* Paris, **260**, 1748-50.

JACQUIN F., JUSTE C., DUREAU P., 1965. Contribution à l'étude de la matière organique des sols sableux des Landes de Gascogne. *C. R. Acad. Agr., Fr.*, 1190-1197.

JENNY H., 1928. Relation of climatic factors to the amount of nitrogen in soils. *J. Amer. Soc. Agron.*, **20**, 900-12.

JENNY H., 1965. Soil nitrogen and its dependence on locality factors. *Pfl. Ernähr. Düng.*, **109**, 97-112, (G) ; in *Soils and Fert.*, 1965, 3638.

KEENEY D. R., BREMNER J. M., 1964. Effect of cultivation on the nitrogen distribution in soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **28**, 5, 653-6.

KENDALL M. G., STUART A., 1966. *The advanced theory of statistics*, 3. Design and analysis, and time series. London Griffin, 552 p.

MAHALANOBIS P. C, 1936. On the generalized distance in statistics. *Proc. nation. Inst. Sci. India*, **2**, 49-55.

MALTERRE H., ALABERT M., 1963. Nouvelles observations au sujet d'un mode rationnel de classement des textures des sols et des roches meubles. Pratique de l'interprétation des analyses physiques. *Bull. Assoc. Fr. Ét. Sol*, **2**, 76-85.

MATTSON S., KOUTLER-ANDERSSON E., 1943. The acid-base equilibrium in vegetation, straw and humus. VI. NH_3 fixation and humus N. *Lantbrucks Högskol. Ann.*, **11**, 107-34.

MONNIER G., TURC L., JEANSON-LUUSINANG C., 1962. Une méthode de fractionnement densimétrique par centrifugation des matières organiques du sol. *Ann. agron.*, **13**, 55-63.

MOREL R., RICHARD A., MASSON P., 1956. Évolution du taux de matière organique du sol sous le climat parisien. VIe *Congr. Sci. Sol.*, **2**, 805-810.

PEDRO C., 1964. *Contribution à l'étude expérimentale de l'altération géochimique des roches cristallines.* Thèse, Paris, Sér. 4164, n° 5015.

PENROSE L. S., 1954. Distance, size and shape. *Ann. Eugenics.*, **18**, 337-34.

SCHREINER O., SHOREY E. C., 1910. The presence of arginine and histidine in soils. *J. biol. Chem.*, **8**, 381-384.

STEVENSON F. J., 1956 *a*. Isolation and identification of some amino compounds in soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **20**, 201-204.

STEVENSON F. J., 1956 *b*. Distribution of the forms of nitrogen in some soil profiles. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **20**, 283-287.

STEVENSON F. J., 1957. Investigations of aminopolysaccharides in soils. I. Colorimetric determination of hexosamines in soil hydrolysates. *Soil Sci.*, **83**, 113-122.

VAN SLYKE D. D., 1911. A method for quantitative determination of aliphatic aminogroups. *J. biol. Chem.*, **9**, 185-204.

VAN SLYKE D. D., 1912. The analysis of proteins by determination of the chemicals groups characteristic of the different amino acids. *J. biol. Chem.*, **10**, 15-55.

VAN SLYKE D. D., 1915. Improvements in the method for analysis of proteins by determination of the chemical groups characteristic of the different amino-acids. *J. biol. Chem.*, **22**, 281-285.

VESSEREAU A., 1948. *Méthodes statistiques en biologie et en agronomie.* Baillères, éd.

Ann. agron., 1968, **19** (6), 685-697.

ACTION DU GEL SUR UNE CULTURE DE BLÉ D'HIVER EN FONCTION DU MICRORELIEF ET DE LA FERTILISATION

G. LEFORT, M. SEBILLOTTE

avec la collaboration technique d'Anne EYRAL

Chaires de Mathématiques et d'Agriculture,
Institut national agronomique, 16, rue Claude-Bernard, 75 - Paris 5e

---

SOMMAIRE

L'action d'une longue période de gel (hiver 1962-1963) sur un blé d'hiver est analysée. Cette action, qui entraîne une diminution du nombre de pieds de blé sur toutes les lignes de semis, est plus forte sur les parties élevées du microrelief. La fertilisation permet un rattrapage du nombre de pieds dans les lignes situées en creux et non dans celles situées sur les buttes. La faible densité moyenne et la fertilisation entraînent une multiplication considérable des adventices, la part des différentes espèces dépendant de la variété du blé.

INTRODUCTION

L'hiver 1962-63 (tabl. 1) s'est caractérisé par une longue période froide qui a entraîné des dégâts importants sur les blés d'hiver, particulièrement lorsque les plantules étaient au stade coléoptile lors de la première vague de froid. La densité du peuplement s'est trouvé ainsi très diminuée, aux alentours de 100 plantes au mètre carré contre 200 à 250 en année « normale » sur la ferme de l'Institut national agronomique à Palaiseau (Essonne). On a alors mis en place, à l'issue de la période froide, un essai destiné à comparer l'action de différentes fertilisations pour « rattraper » cette faible densité.

TABLEAU I

Climatologie-hiver 1962-63

Vagues de froid principales	Dates			
	1-8/12/62	22-30/12/62	6-1/6-4/63	17-2/2-3/63
Nbre de j. avec température (à 2 m) :				
minima ± — 10°C	0	6	18	3
maxima ± — 4°C	0	7	12	3

— Au total 65 jours de température moyenne négative.

— La température du sol à 30 cm de profondeur a été négative du 25 décembre à la fin des froids.

— Neige (10 cm) le 20 février.

— L'abaissement de température a été relativement lent lors de la première vague de froid ; du 30-11 au 2-12 la température de l'air (2 m du sol) est passée de + 3°C à — 3°C et celle du sol à — 10 cm de + 4°C à 0°C.

— Le champ étudié a été semé le 28 novembre. Du 28-11 au 1-12 et du 9-12 au 23-2 la température du sol à — 10 cm a été positive ou nulle ; la somme de températures pour cette période est de 43°. On ne dispose pas d'enregistrement au niveau du lit de semence. *On peut penser que l'ensemble des grains étaient au stade coléoptile lors de la deuxième vague de froid.*

MATÉRIEL ET MÉTHODES

L'essai était implanté sur limon des plateaux, en situation plane. La granulométrie du sol est la suivante : Argile 15 p. 100 limon 28 p. 100 sables très fins 52 p. 100 sables fins 2 p. 100 sables grossiers 3 p. 100.

La matière organique totale est de : 1,8 p. 100.

Le dispositif expérimental comprenait 4 blocs, avec deux variétés : *Capelle* et *Étoile de Choisy*, chacun comportant les 4 traitements de fertilisation suivants :

TABLEAU 2

Protocole de l'essai fertilisation

Dates d'applications	Traitements			
	1	2	3	4
Octobre 1962 :	110 PK	110 PK	110 PK	110 PK
27 mars 1963 : au début de la reprise de la végétation	50 N	100 N	50 NPK	100 NPK
17 mai 1963 : montaison	50 N	50 N	50 N	50 N

Les apports d'azote seul sont faits sous forme d'ammonitrate 34 p. 100, les autres engrais sont sous forme complexe (triple 10 ou scories potassiques 14-14).

A la reprise de la végétation, après l'épandage d'engrais, une grande hétérogénéité dans le peuplement s'est très vite manifestée. La surface du champ d'essai était légèrement billonnée et on constatait que les lignes situées en creux étaient visuellement plus denses que celles situées sur les buttes (1). La proportion des lignes sur les buttes et les creux variant selon les parcelles, le protocole d'origine se trouvait inapplicable ; de plus, certaines parcelles ont été attaquées par des moineaux. L'étude statistique sera donc conduite de manière à analyser cette hétérogénéité, les comparaisons brutales de rendement n'ayant plus de sens.

A la récolte, la totalité des plantes a été prélevée, ligne par ligne sur 2 parcelles de la variété *Cappelle* ; faute de moyens suffisants on a dû se limiter à compter les pieds, une rangée sur deux, dans plusieurs parcelles, les épis étant ramassés globalement. Quelques observations ont été faites sur la variété *Étoile de Choisy*.

L'évolution du blé, au cours de la campagne, est résumé dans le tableau 3 :

TABLEAU 3

Évolution du blé

Date	Stade végétatif
28-11-62	Semis
A partir du 2-3-63	Fin de la levée
23-3-63	Début reprise active de la végétation
23-4-63	*Étoile de Choisy* développement foliaire plus élevé que *Capelle*.
	Étoile de Choisy : Talles 1er et 2e feuilles très développées. Talle 3e feuille : 1 feuille.
	Cappelle : talle moins développé, apparition des premières talles de 3e feuille.
	En moyenne, avance d'une feuille sur les parcelles 100 N.
8-5-63	Début envahissement des adventices.
17-5-63	*Étoile de Choisy* : pleine montaison.
	Cappelle : tout début montaison.
21-8-63	Adventices très nombreuses.
	Récolte.

A Versailles, JONARD (1964) a observé, au cours de plusieurs années, pour des semis de fin novembre, les dates suivantes :

stade 2-3 talles : fin février,
stade montaison : première quizaine d'avril.

RÉSULTATS

I. — *Étude détaillée de deux parcelles* (variété *Cappelle*)

Sur deux parcelles du bloc II soumises aux traitements 1 et 3, nous avons relevé les composantes de rendement par ligne de blé en notant la situation par rapport au microrelief : butte (B) et creux (C) (*d*, *e*, *m*, *p* sont respectivement le nombre de pieds sur 1,5 m ; le nombre moyen d'épis par pied, le nombre de grains par épi et le poids de 1 000 grains) :

(1) Le microrelief était dû au passage des roues du tracteur à la préparation du semis, puis au semis lui-même, et au passage des roues du semoir. Le double passage du tracteur explique qu'il n'y ait pas exactement la même proportion de lignes sur les buttes et les creux dans chaque parcelle. Les dénivellations étaient de l'ordre de quelques centimètres, toujours inférieures à 10.

Ligne	Relief	Fertilisation 1				Relief	Fertilisation 3			
		d	*e*	*m*	*p*(*)		*d*	*e*	*m*	*p*(*)
1	B	11	3,54	37,7	49,4	B	27	2,55	31,6	50,8
2	B	21	2,61	36,3	49,5	B(1)	28	1,32	24,7	40,2
3	C	22	2,59	37,2	49,0	C	46	2,54	32,3	46,7
4	C	34	3,17	32,7	50,4	C	43	2,60	28,7	50,7
5	C	31	3,58	32,4	49,5	B	22	3,50	29,5	51,0
6	B	25	2,16	28,6	50,8	B	27	2,14	31,7	50,0
7	C	41	3,17	35,2	48,2	C	40	2,82	48,5	49,5
8	C	38	2,89	29,7	52,0	C	34	3,17	28,8	50,4
9	B	38	3,00	32,5	50,5	B	33	2,93	27,7	49,3
10	B	23	3,78	32,3	49,8	B	23	3,56	33,7	50,8
Moyenne des buttes		23,6	3,02	33,4	50,0		26,6	2,94	30,8	50,4
Moyenne des creux		32,6	3,08	33,4	49,8		40,7	2,78	34,6	49,3

(*) Il s'agit de poids secs.

(1) Les résultats de la ligne 2, traitement 3, diffèrent significativement de ceux des autres lignes occupant la même position. Elle est donc aberrante sur le plan statistique, c'est pourquoi elle a été éliminée des calculs. Les raisons du comportement de cette ligne ne sont pas connues.

La lecture de ce tableau confirme l'impression visuelle d'une grande variabilité du nombre de pieds ; nous allons d'abord étudier ce caractère et ensuite l'ensemble des autres composantes du rendement.

a) *Nombre de pieds.*

Il y a deux facteurs contrôlés de variation (1) : microrelief (butte (B) ou creux (C)) et fertilisation 1 ou 3 ; nous distinguerons quatre types de résultats : C 1, B 1, C3, B 3. La comparaison deux à deux des espérances des variables aléatoires associées, permet, mieux qu'une analyse de variance, d'interpréter le phénomène lorsqu'il y a interaction entre les deux traitements. Le modèle mathématique, discuté en fin de paragraphe, conduit à utiliser pour cette comparaison des variables de Student, à 15 degrés de liberté, dont les valeurs expérimentales sont :

Différences			
C1 — B1	C3 — B3	B3 — B1	C3 — C1
2,15	3,04	0,54	1,59

Valeurs de t relatives aux niveaux :

0,20 : 1,341 0,05 : 2,131
0,10 : 1,753 0,01 : 2,947

— les espérances du nombre de pieds sur les buttes et les creux sont différentes ;

— il n'y a aucune raison de penser que les traitements 1 et 3 ont une action différente sur le nombre de pieds sur les buttes ;

— il n'est pas établi que les traitements 1 et 3 aient une action différente sur le nombre de pieds dans les creux. Mais la puissance du test est faible : si la différence entre les espérances des nombres de pieds est de 5, il y a une probabilité égale à 0,15 de rejeter l'hypothèse d'égalité de ces espérances ; si la différence atteint 10 la probabilité n'est encore que de 60 p. 100. De plus, la valeur de t n'est pas très éloignée de la valeur relative au seuil 10 p. 100 retenu. Il est donc prématuré de formuler une conclusion à l'issue de cette première étape de l'analyse.

b) Discussion du modèle mathématique.

— Dans les conditions de l'expérience le peuplement est faible et nous accepterons de négliger la concurrence entre pieds voisins, ou pieds de lignes contiguës. Nous admettons en outre que le nombre n de graines semées sur 1,50 m est une constante. Par suite :

(1) L'influence du semoir employé a été étudiée depuis ; elle ne saurait expliquer ces alternances et leur sens. En effet dans ces sols battants, ce sont les rangées correspondant aux traces de roues, donc ici aux creux, qui sont les moins peuplées à la sortie de l'hiver à cause des phénomènes liés à la faible stabilité structurale. L'ensemble des autres lignes est homogène.

— la variable D_i, égale au nombre de pieds sur 1,50 m de la ième rangée, a une loi binomiale de paramètre n et p_i (p_i est la probabilité pour un grain de donner une plante à la récolte dans la ième rangée) ;

— les variables D_i sont indépendantes. ;

— nous posons que la probabilité p_i ne dépend que de la combinaison des 2 facteurs contrôlés : microrelief et fertilisation ;

— la loi de la variable D_i peut être approchée par une loi normale, d'espérance np_i et de variance np_i (1 — p_i). Les résultats expérimentaux permettent de penser que p_i est compris entre 1/3 et 2/3 et que le produit $p_i(1 - p_i)$ compris entre 2/9 et 1/4 est pratiquement constant ; nous admettons donc que la variable D_i a une variance indépendante de l'indice « i ». L'étude des quatre estimations de cette variance, obtenue en considérant successivement les lignes B 1, B 3, C 1 et C 3, n'infirme pas cette hypothèse. L'estimation de la variance a donc été calculée sur l'ensemble de ces résultats avec 15 = 19-4 degrés de liberté.

4. Le nombre des résultats recueillis est faible ; aussi, pour éviter d'utiliser des tests trop peu puissants avons-nous choisi, pour l'ensemble de cette étude, un risque de première espèce égal à 10 p. 100 (le risque de première espèce est la probabilité de rejeter l'hypothèse si elle est vraie).

c) Autres composantes du rendement.

Les trois autres variables étudiées sont les moyennes, pour l'ensemble des pieds d'une ligne, du nombre d'épis par pied, du nombre de grains par épi et du poids d'un grain ; ces moyennes sont calculées chacune sur un nombre de résultats de 20 à 40 ; aussi avons-nous remplacé la loi exacte de ces variables, qui est inconnue, par la loi asymptotique, c'est-à-dire par une loi normale.

Nous avons admis que la situation ou le traitement ne modifient pas la matrice des covariances de cette loi, hypothèse qui est très généralement vérifiée et que nous ne pouvions tester valablement à cause du petit nombre de résultats.

Nous avons testé l'hypothèse que les espérances de ces variables ne dépendent ni de la situation ni de la fertilisation, c'est-à-dire l'homogénéité de la population pour l'ensemble des trois caractères étudiés (analyse multivariate). L'acceptation de cette hypothèse dépend des valeurs de variables F de Fischer-Snedecor à 3 et 13 degrés de liberté, valeurs qui sont ici :

0,51 pour la situation
0,21 pour la fertilisation

Ces valeurs sont inférieures à 1, il n'y a aucune raison de mettre en doute l'homogénéité.

Ces deux études montrent que, dans cette expérience, les variations du nombre de pieds rendent compte de la plus grande part des variations du rendement ; c'est pourquoi nous considérons dans la suite ce seul caractère.

II. — *Étude du nombre de pieds sur l'ensemble des parcelles*

Les nombres de pieds relevés dans plusieurs parcelles sont ventilés, dans le tableau ci-dessous, selon la situation (butte ou creux) et le traitement de fertilisation (1, 2, 3 ou 4). Les résultats de l'étude précédente sont repris dans ce tableau.

L'objet principal de l'étude est l'action de la fertilisation sur le nombre de pieds. Il résulte du paragraphe I qu'une action différente des traitements sur les pieds des buttes ou des creux est à envisager (il y a peut être interaction entre la situation

Bloc et relief		Traitements			
		1	2	3	4
I	Butte			19,5	28,5
	Creux			31,7	29,0
II	Butte	23,6		26,7	24,3
	Creux	33,2		40,8	33,0
III	Butte	25,0	23,0		
	Creux	29,7	32,7		
IV	Butte	24,0	25,0		
	Creux	24,5	26,0		
moy.	Butte	24,0	23,7	24,9	26,0
	Creux	30,4	28,9	36,9	31,7

et le traitement) ; il est alors préférable d'étudier séparément les buttes et les creux. Pour chacune de ces situations, nous avons une analyse de variance à deux facteurs : blocs et traitements.

Les valeurs obtenues pour les variables F sont les suivantes :

	Buttes		Creux	
	Interaction blocs-traitements	Effet traitement	Interaction blocs traitements	Effet traitement
F	0,96	0,17	0,24	2,65
Degrés de liberté	2-17	3-17	2-18	3-18

Valeurs de F pour 3 et 18 degrés de libertés aux seuils :
0,10 : 2,42 0,05 : 3,16

— Les traitements agissent de la même manière dans tous les blocs.

— Le nombre de pieds sur les buttes ne dépend pas du traitement.

— Pour les pieds situés en creux, nous pouvons maintenant conclure, au niveau 10 p. 100 retenu, à une action différente des divers traitements.

Le traitement 3 paraît plus efficace que les autres. Cette conjecture est confirmée par le test de comparaison de son effet à la moyenne des trois autres (avec 18 degrés de liberté $t = 1{,}82$ alors que le seuil au niveau 0,10 est égal à 1,73).

Le dispositif comprenait également la variété *Étoile de Choisy* ; les observations visuelles et les quelques comptages effectués paraissent en accord avec les conclusions obtenues sur la variété *Cappelle* :

Nombre de pieds sur 1,50 m

Bloc — Traitements	1	2	3	4
I Butte			24,7	32,0
Creux			39,5	37,5
II Butte	29,5			24,0
Creux	28,3			38,2

III. — *Comportement des adventices*

Un peuplement élevé d'adventices, prévisible à cause de la faible densité des deux variétés et du retard de leur développement, a été rapidement confirmé par les observations visuelles. Le 25 mai, avant traitement herbicide, des comptages ont été effectués, pour chaque variété, sur 2 m² dans des parcelles contiguës, l'une ayant subi le traitement 4, et l'autre, hors dispositif, n'ayant pas été fertilisée après les froids.

Nombre d'adventices sur 2 m²

Adventices	Avec engrais azoté		Sans engrais azoté	
	Cappelle	*Étoile de Ch.*	*Cappelle*	*Étoile de Choisy*
Sanve et Bourse à Pasteur	145	34	111	48
Matricaire	79	49	34	60
Renouée. Liseron et Renouée des oiseaux	77	136	23	54
Renouée persicaire	103	71	0	9
Divers (1)	122	110	62	56
Total	526	400	230	227

(1) Le Mouron des oiseaux et le Chenopode en constituent plus de la moitié.

— La fertilisation apportée, presque certainement par l'azote qu'elle contient (1), a doublé le nombre des adventices.

— En l'absence de fertilisation, le nombre d'adventices est le même pour les deux variétés ; la différence est hautement significative s'il y a apport d'engrais. (L'hypo-

(1) Toutes les parcelles et le témoin avaient reçu 110 unités d'acide phosphorique et de potasse à l'automne sous forme de scories potassiques.

thèse que les 926 plantes se répartissent, avec une probabilité de 0,5, entre chacune des deux parcelles fertilisées est rejetée au niveau 10^{-4}).

— Le nombre de plantes, par espèces ou par groupes d'espèces, et leur importance relative dans les quatre populations suggèrent les remarques suivantes :

— Sanve (*Sinapis arvensis*) et Capselle bourse à pasteur (*Capsella bursa pastoris*) : variation faible avec la fertilisation, mais élevée avec la variété de céréale ; ces deux plantes, dont le développement est précoce, subissent une concurrence plus élevée de l'*Étoile de Choisy* plus hâtif que *Cappelle*.

— Renouée persicaire (*Polygonum persicaria*) : action décisive de l'azote, cette plante ne s'étant développée qu'avec la fertilisation ; dans ce cas, la différence significative entre les deux variétés est liée aux précoccités voisines d'*Étoile de Choisy* et de la Renouée persicaire.

— Renouée liseron (*Polygonum convolvulus*) et Renouée des oiseaux (*Polygonum aviculare*) : c'est le seul cas où l'invasion est significativement plus forte pour *Étoile de Choisy* que pour *Cappelle* ; la fertilisation triple leur nombre.

— L'action de la fertilisation faible ou nulle sur les Sanves, les Capselles bourse à pasteur et les Matricaires (*Matricaria inodora*), et fortement positive sur les autres adventices, entraîne une diminution de l'importance relative du premier groupe.

IV. — *Discussion et interprétation*

Le blé, semé le 28 novembre 1962, commençait à « pointer » au début de la vague de froid. On sait que le stade coléoptile, qui était celui de la majorité des pieds, est la période de plus grande sensibilité au froid.

Sur des mottes de terre, prélevées le 6 février et mises à dégeler, on observait, 10 jours plus tard, que :

— la vitalité de tous les pieds se manifestait par l'émission de nouvelles racines ;

— mais, dans la moitié des cas environ, les coléoptiles ne reprenaient pas leur croissance et les plantes ne levaient pas. La majorité des coléoptiles ont pris un aspect vitreux et ils sont alors très cassants, certains sont seulement nécrosés dans leur partie supérieure.

Des comptages effectués à la récolte sur des parcelles de la même variété, l'année étudiée, la précédente et la suivante ont donné les résultats moyens suivants sur 1,50 m :

1963	1963	1963	1962	1964
Butte 24,5	Creux 31,4	Moyenne 28,1	64,4	81,8

Les conditions climatiques ont ainsi entraîné une diminution de plus de 50 p. 100 du peuplement (1).

(1) Les dégâts ont été décrit précédemment (SEBILLOTTE, 1963, 1964).

Cette période de froid s'est caractérisée par sa durée plus que par son intensité ce qui explique que tous les pieds soient restés vivants. Le plateau de Palaiseau, où se trouve la parcelle, est très venté et on peut penser que le vent a entraîné un abaissement de température et une dessiccation plus importants ou plus rapides sur les buttes que dans les creux, d'où le comportement différent des pieds de blé qui a été observé et qui est confirmé par l'analyse statistique. Il y a également réaction différente à la fertilisation à l'issue du gel : elle paraît agir dans les creux et non sur les buttes. Ceci suggère les hypothèses suivantes:

— sur les buttes, l'action du gel a un effet de tout ou rien, la levée est, soit impossible à cause de l'état du coléoptile, soit acquise ;

— dans les creux, il y a, en outre, des pieds dont la levée dépendra des conditions de milieu après la fin du gel.

Malgré ces différences de peuplement, les trois autres composantes de rendement (tallage-épi, nombre de grains par épi, poids des grains) sont indépendantes du microrelief : le rendement est donc différent sur les buttes et dans les creux. Les conditions climatiques de l'année par leurs conséquences sur le blé mettent apparemment en défaut les résultats de travaux antérieurs (JONARD et KOLLER, 1951) : une année donnée, le rendement est indépendant du peuplement, pour des densités variant de 90 à 450 pieds au mètre carré. En particulier, le tallage-épis est habituellement une fonction décroissante du peuplement comme nous le vérifions sur les résultats, aux champs, de plusieurs années (fig. 1) ; or il a, ici, une valeur indépendante de

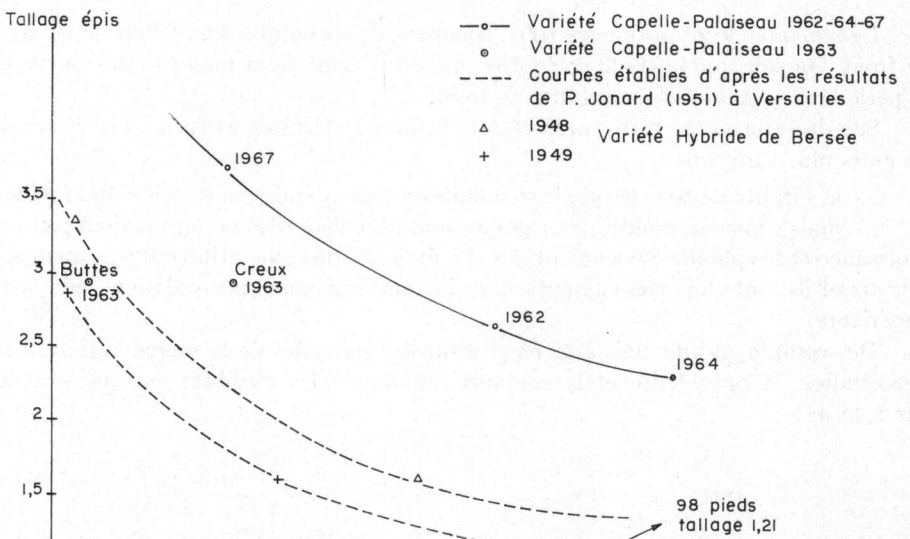


FIG. 1. — *Tallage-épis et densité linéaire du blé*

la densité de pieds et très inférieure à celle que l'on pouvait attendre. L'explication de ces faits paraît être que la phase levée — stade B, qui limite le tallage herbacé, a été plus courte que les autres années (tabl. 3), aussi n'y avait-il, au début de la montaison, que deux à quatre talles primaires par pied. En l'absence de compétition,

les conditions climatiques seules auraient réglé la montaison ; sa réalisation à une période plus tardive, et donc plus chaude que les autres années, peut, aussi, avoir entraîné une diminution du nombre de tiges porteuses d'un épi (JONARD, 1964).

Au total, le faible peuplement a entraîné pour les trois autres composantes des valeurs supérieures à celles des deux années voisines (tabl. 4) : le tallage-épis, inférieur à ce qui était prévisible, a été, en partie, compensé par un nombre de grains et un poids plus élevé (la comparaison avec 1967 pour ces deux dernières composantes n'a pas été faite à cause d'un échaudage important) ; c'est ainsi que dans les creux et pour les deux parcelles totalement recensées, on observe des rendements moyens d'environ 60 quintaux de grains secs à l'hectare, comparables à ceux habituellement observés ; sur les buttes, les rendements moyens n'atteignent pas 40 quintaux de grains secs.

TABLEAU 4

Composantes du rendement

Années	*d* (sur 1 m)	*e*	*m*	*p*
1962	42,9	2,60	31,9	43,64
1964	54,5	2,29	26,6	48,70
1967	25,3	3,67	—	—
1963-1-*b*	15,7	3,02	33,4	50,
c	21,8	3,08	33,4	49,8
-3-*b*	17,7	2,94	30,8	50,4
c	27,1	2,78	34,6	49,3

CONCLUSION

L'implantation du dispositif avait pour but l'étude de la fertilisation, sur une parcelle de blé, à l'issue d'une période de froid et n'avait pas tenu compte de l'influence du microrelief qui n'était pas observable à ce moment. Ce sont les observations en cours de végétation qui ont suggéré la nécessité d'une analyse distincte des lignes de blé suivant leur situation, et nous avons montré que le facteur prépondérant de variation du rendement était précisément le microrelief. Une étude négligeant ce facteur, aurait couru le risque d'attribuer aux traitements une différence de rendement due seulement à une variation de la population des buttes et des creux. Toute expérimentation au champ est soumise à ce risque d'erreur, elle nécessite donc une analyse détaillée des interactions possibles entre le milieu naturel et les traitements.

L'expérience a montré une action de la fertilisation après la période de gel sur les nombres de pieds de blé situés dans les creux et malgré le faible peuplement, on a obtenu un rendement moyen acceptable sur l'ensemble du dispositif, 44 q/ha de grains secs ; mais la fertilisation nécessite une action rigoureuse contre les adventices. La supériorité probable du traitement 3 (100 N-50 P-50 K) sur les autres traitements, y compris le traitement 4 (150 N-100 P-100 K) invite à reprendre ce type d'expérience pour étudier l'intérêt d'une fertilisation N-P-K par rapport à une fertilisation N.

La protection des lignes de blé situées dans les creux a entraîné pour celles-ci un rendement moyen de 60 quintaux de grains secs, comparable à celui des autres années. Il y a donc intérêt, dans les régions froides et ventées, à mettre au point des techniques de semis réalisant le même type de protection (1).

Reçu pour publication en avril 1968.

SUMMARY

ACTION OF FROST ON WINTER WHEAT
AS A FUNCTION OF MICRORELIEF AND FERTILIZATION

On two plots of winter wheat (var. *Cappelle* and *Etoile de Choisy*) the effects of a long frost period (Winter 1962-1963) caused a decrease in the number of the wheat plants ; this decrease was higher on the mounds of the microrelief than in the hollows.

An application of fertilizers, at the end of this frost period, allowed to « save » wheat plants growing in the hollows, but not those on the mounds. The fertilizing joined to a low density (about 100 plants per square meter) causes very high increase in weeds, the ratio of each species depending on the wheat variety.

The protection of the rows of wheat in the hollows allowed to obtain an average production of 60 q of dry grain, thanks to a certain catching up on the other crop components.

It is therefore desirable in the cold windy areas, to work out sowing techniques which produce the same type of protection.

ZUSAMMENFASSUNG

VERÄNDERUNG DER FROSTWIRKUNG AUF EINEM WINTERWEIZEN
IN ABHÄNGIGKEIT VON MIKRORELIEF UND DÜNGUNG

Infolge einer langen Frostperiode (Winter 1962-1963) wurde auf zwei Winterweizenparzellen (Sorten *Cappelle* und *Étoile de Choisy*) eine Herabsterung der Weizenpflzanzanzahl beobachtet. Diese Herabsetzung war stärker auf den Hügeln des Mikroreliefs als in den Liefer liegenden Stellen.

Eine Düngerzugabe am Ende der Frostperiode erlaubte es, einige Weizenpflanzen in den Vertiefungen nicht aber auf den Hügeln zu « retten ». Eine Düngung verknüpft mit einer niedrigen Pflanzandichte wirkt sich durch starke Vermehrung der Unkräuter aus, wobei der Anteil an jeder Unkrautart von der Weizensorte abhängig ist.

Die geschützte Lage der in den Vertiefungen wachsenden Weizenreihen ergab für letzteren eine durchschnittliche Ertragsleistung von 60 Doppelzentner trockenem Korn, unter Einholung anderer Ertragskomponenten. In den kühlen und windigen Gebieten wäre es also vorteilhaft, Aussaatverfahren zu entwickeln, welche die gleichen Schutzmassnahmen erlauben.

РЕЗЮМЕ

Изменения действия холода на озимую пшеницу в зависимости от микрорельефа и удобрения.

Г. ЛЕФОР, М. СЭБИЙОТТ.

На двух делянках засеянных озимой пшеницей (сорта Капель и Этуаль де Шуази) действие длительного периода морозов (зима 1962-1963) вызвало уменьшение числа растений пшеницы; уменьшение это было более

(1) Ceci rejoint les préoccupations d'autres auteurs qui ont étudié l'influence de l'orientation des lignes sur l'action du froid (WEST et PRINE, 1961) ou l'influence du microrelief sur la distribution des températures dans une culture de maïs (BURROW, 1963).

чувствителыным в возвышенных частях микро-рельефа, чем в низинах.

Внесение удобрений сразу после периода морозов позволило « спасти » растения пшеницы расположенные только в низинах. Удобрение и разрежение густоты стояния (приблизительно 100 растений на м²) вызвали сильное размножение сорной растительности, процентное количество каждого вида которой, зависело от сорта пшеницы.

Защита полос пшеницы расположенных в низинах привела, благодаря частичной компенсации некоторыми составными урожая, к средней продукции в 60 центенеров сухого зерна. Можно значит сказать что в холодных и ветренных районах, представляет интерес разработать такую технику посева, при которой могла-бы быть реализована такого рода защита.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BURROW W. E., 1963. Characterization of soil temperature distribution from various tillage-induced microreliefs. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* **27**, (3), 350-353.

JONARD P., 1964. Étude comparative de la croissance de deux variétés de blé tendre. *Ann. Amélior. Plantes*, (2), 101-130.

JONARD P., KOLLER J., 1951. Les facteurs de la productivité chez le Blé, résultats obtenus en 1948 et 1949. *Ann. Amélior. Plantes*, (2), 256-275.

SEBILLOTTE M., 1963. En parcourant nos terres. *Rev. agric. Fr.*, 17 mai, 19-21, 1964. Le blé et le froid. *Bull. CETA*, étude nº 871.

WEST S. H., PRINE G. M., 1961. Influence of row direction on microclimate yield, and damage by freezing in lupine and oats. *Soil Crop Sci. Fla. Proc.*, **21**, 140-147.

Ann. agron., 1968, **19** (6), 699-704.

NOTE ANALYTIQUE

DOSAGE COLORIMÉTRIQUE DU BORE TOTAL DES MINÉRAUX, DES ROCHES ET DES SOLS AU MOYEN DU 1-1′ DIANTHRIMIDE

J. MAURICE

Station d'Agronomie,
Bd Kerguelen, 29 S - Quimper
Institut national de la Recherche agronomique

SOMMAIRE

La présente note est consacrée à la description d'une méthode de dosage du bore total des minéraux, des roches et des sols. L'échantillon est décomposé par fusion alcaline. Le bore est déterminé par spectrophotométrie au moyen du 1-1′ dianthrimide. La méthode est rapide, précise et reproductible.

INTRODUCTION

De fort nombreuses méthodes, reposant sur des principes les plus variés, ont été suggérées pour l'étude de la distribution quantitative du bore. Cependant, nombre d'entre elles ne conviennent pas pour le dosage de cet élément lorsqu'il apparaît en trace comme dans les minéraux, les roches et les sols. Pour les très faibles teneurs, les méthodes appropriées sont notamment la méthode spectrographique et la méthode colorimétrique. Nous nous proposons d'adapter la méthode colorimétrique au dosage du bore total dans des édifices silicatés et de retenir comme réactif colorimétrique le 1-1′ dianthrimide.

En effet, dans une étude antérieure (MAURICE et TROCMÉ, 1965), il a été montré que ce colorant est un réactif à la fois particulièrement sensible du bore et ne présentant que peu d'interférence avec les autres éléments. Les données sur la formation du complexe 1-1′ dianthrimide-bore ayant été décrites dans cette étude, nous ne verrons successivement que les réactifs utilisés et le mode opératoire suivi. Toutefois, rappelons que le 1-1′ dianthrimide donne avec le bore en milieu sulfurique concentré un complexe soluble bleu dont l'intensité de coloration dépend des quantités présentes de

bore, de colorant et de la concentration en acide sulfurique, et qu'au maximum d'absorption ($\lambda = 6\,300$ Å) la loi de Lambert-Beer est parfaitement suivie, au moins dans l'intervalle 0-2,5 γ de bore (pour les conditions opératoires indiquées ci-dessous).

I. — RÉACTIFS UTILISÉS

— Acide borique cristallisé pour analyses, H_3BO_3 : solution-mère à 2 040 mg par litre, solution-fille à 40,8 mg par litre.

— Sulfate d'hydrazine pour analyses, $H_6N_2O_4S$: solution saturée.

— 1-1′ dianthrimide ou 1-1′ dianthraquinoylamine pour analyses, $(COC_6H_4COC_6H_3)_2NH$: solution-mère à 400 mg dans 100 ml d'acide sulfurique concentré pour toxicologie $d = 1{,}83$, solution-fille à 20 mg dans 100 ml du même acide.

— Acide sulfurique concentré pour toxicologie $d = 1{,}83$ ou acide chlorhydrique fumant pour analyses $d = 1{,}18$.

— Carbonate de sodium anhydre pour analyses Na_2CO_3.

— Eau déminéralisée par bipermutation sur colonnes échangeuses de résines.

II. — MODE OPÉRATOIRE SUIVI

1. *Préparation de l'échantillon*

L'échantillon est broyé en morceaux et pulvérisé au mortier d'agate jusqu'à ce que les particules obtenues passent à travers un tamis présentant une ouverture de mailles de 0,315 mm. Cette pulvérisation assure à des prises d'essais de 1 gramme une homogénéité suffisante. Pour des prises d'essais plus faibles, de 50 mg à 200 mg, GRILLOT et *al.* (1964) font pousser le broyage jusqu'à 50 μ.

2. *Attaque des silicates*

La technique employée pour attaquer les carcasses silicatées et conduire à la mise en solution du bore est la fusion alcaline. Pour réaliser celle-ci, il est possible d'utiliser le carbonate de sodium anhydre (DIBLE et *al.*, 1954 ; KRAMER, 1955 ; GUPTA, 1966), le carbonate de potassium (FLEET, 1967) ou le carbonate double de sodium et de potassium (GRILLOT et *al.*, 1964). Nous avons choisi comme fondant le carbonate de sodium anhydre parce qu'il n'est pas hygroscopique.

Pour les sols, une destruction de la matière organique par calcination (à 500° pendant 3 à 4 h après montée progressive de la température) est nécessaire avant d'effectuer la fusion.

A 1 gramme de poudre sont mélangés intimement 6 grammes de carbonate de sodium anhydre. La fusion a lieu dans un creuset de platine qui est porté sur un triangle en tubes de silice montée sur nickel-chrome. Nous chauffons au bec Méker mais d'abord doucement et de biais pour éviter des débordements. Dès que les silicates sont attaqués, le gaz carbonique est libéré et le produit mousse. A ce moment, nous couvrons, mais incomplètement, le creuset d'un couvercle de platine et nous augmentons le chauffage progressivement jusqu'à ce que l'ensemble soit bien fondu et qu'il n'y ait plus de bulles. Alors l'attaque est terminée. En effet, les données indiquées au tableau 1 montrent qu'il n'y a pas lieu de maintenir plus longtemps le chauffage.

Le temps nécessaire pour que l'ensemble soit fondu peut varier de 10 à 30 minutes suivant la nature de l'échantillon. Dès que la fusion est terminée, le produit fondu est étalé sur la surface intérieure du creuset par des mouvements de rotation.

3. *Reprise de la fusion à l'acide*

Par son point de fusion élevé (852°C), le carbonate de sodium doit entraîner une décomposition complète des silicates. Après fusion alcaline, il doit rester des carbonates métalliques, des silicates

alcalins et l'excès de carbonate de sodium. Ce mélange repris à l'acide étendu doit entraîner un dégagement de gaz carbonique et une décomposition des silicates alcalins en sels alcalins et en silice.

TABLEAU 1

Influence de la durée de fusion liquide sur la teneur en bore des échantillons

Nature de l'échantillon	Temps de chauffage en mn après début de fusion liquide		
	0	15	30
Tourmaline	3,13 % B	3,11 % B	3,12 % B
Illite	189,8 p.p.m. B	192,2 p.p.m. B	190,9 p.p.m. B
Granite	70,3 —	70,5 —	69,9 —
Sol	56,2 —	56,1 —	56,7 —

Chaque valeur représente la moyenne de 6 dosages.

Pratiquement, nous prenons un bécher en polyéthylène de 150 ml au fond duquel nous posons le couvercle et le creuset de platine. La croûte adhérant au métal est décomposée au moyen d'une solution étendue d'acide sulfurique ou d'acide chlorhydrique. Pour recouvrir le creuset dans la position renversée, nous employons 75 ml de cette solution. La quantité d'acide utilisée est de 5 ou 15 ml suivant qu'il s'agit de l'acide sulfurique ou de l'acide chlorhydrique. Pour éviter les projections, un verre de montre est déposé sur le bécher.

Après cette reprise de la fusion à l'acide, il est ensuite effectué, en général, une insolubilisation de la silice en milieu chlorhydrique. Mais, selon CHARLOT (1966), les évaporations à sec en milieu acide ont pour conséquence d'une part, une volatilisation du bore sous forme d'acide borique par entraînement par la vapeur d'eau et, d'autre part, une insolubilisation de cet élément sous forme de borosilicates. Les résultats présentés au tableau 2 montrent que, effectivement, l'insolubilisation de la silice conduit à de substantielles pertes en bore, mais variables selon la nature des échantillons. Toutefois, nous n'avons pas été en mesure de conclure quant à la nature de ces pertes.

TABLEAU 2

Influence de l'insolubilisation de la silice sur la teneur en bore des échantillons

Résultats exprimés en p.p.m. B

Nature de l'échantillon	Silice non insolubilisée	Silice insolubilisée
Illite	193,5	161,0
Granite de Vire	70,2	56,7
Schistes 1	114,1	105,1
Schistes 2	81,4	76,3
Sol	56,6	47,5

Chaque valeur représente la moyenne de 6 dosages.

Aussi, pour éviter ces pertes, après reprise de la fusion à l'acide, effectuons-nous directement la filtration.

4. *Filtration*

La filtration est réalisée en utilisant un entonnoir en polyéthylène et un papier-filtre sans cendres, d'un diamètre de 150 mm et exempt de bore. Le filtrat est recueilli dans un flacon en polyéthylène.

Par suite de la présence d'une quantité importante de silice sous forme polymérisée, la filtration complète exige un temps très long. Mais nous avons constaté qu'une filtration partielle est suffisante pour la détermination des teneurs en bore des échantillons (voir plus loin contrôles avec addition d'acide borique). Bien entendu, il faut alors connaître le volume de liqueur à filtrer.

5. *Colorimétrie*

En vue du dosage, nous prélevons 0,7 ml de filtrat auquel nous ajoutons d'abord 0,3 ml de solution aqueuse saturée de sulfate d'hydrazine, puis 10 ml d'acide sulfurique $d = 1{,}83$ contenant 2 mg de 1-1′ dianthrimide. Le développement de la couleur s'effectue dans des tubes à essais en verre de chimie que l'on porte dans une étuve à 90° ± 2°C, pendant 3 heures. Après refroidissement des solutions, l'absorption est mesurée à 6 300 Å dans des cuves de 2 cm et comparée à celle d'une gamme préparée à l'aide d'une solution d'acide borique.

La valeur des à-blanc est d'environ 0,02-0,03 γ de bore et correspond à la limite de la sensibilité de la méthode.

6. *Contrôles avec addition d'acide borique*

Après addition à divers échantillons fondus d'une quantité connue de bore sous forme d'acide borique en solution et après décomposition à l'acide et filtration partielle, nous obtenons les valeurs indiquées au tableau 3.

TABLEAU 3

Apports d'une quantité connue de bore à divers échantillons

Nature de l'échantillon	Bore dosé en γ dans la prise d'essai	Bore dosé après addition de 1 γ
Illite	1,23	2,23
Granite de Vire	0,66	1,64
Granite de Trégastel	0,19	1,18
Schistes micacés	0,60	1,60
Schistes ardoisiers	0,72	1,68
Sol 1	0,65	1,62
Sol 2	0,53	1,48

Chaque valeur représente la moyenne de 6 dosages.

Ces données indiquent que l'on retrouve le bore apporté dans une proportion de 98 p. 100 environ en moyenne, ce qui montre qu'il n'y a pas d'interférence avec les autres éléments et justifie la filtration partielle.

7. *Reproductibilité de l méthode*

Comme les résultats présentés au tableau 4 le montrent, nous obtenons une reproductibilité satisfaisante.

TABLEAU 4

Bore total. — Variabilité des résultats

Nature de l'échantillon	Nombre de fusions	Valeur moy. en p.p.m.	Valeurs extrêmes p.p.m.		Coefficient de variation en %
			mini	maxi	
Illite 1	15	193,5	187	198	1,37
Illite 2	6	131,6	129	134	1,51
Sol 1	18	56,6	54	61	3,65
Sol 2	6	69,7	66	73	3,50
Granite de Vire	14	70,2	68	73	2,57
Granulite	6	12,5	11	14	10,88
Schistes micacés	6	154,6	149	160	2,23

En définitive, la technique utilisée est rapide tout en étant suffisamment précise et reproductible.

Reçu pour publication en août 1968.

SUMMARY

COLORIMETRIC ANALYSIS OF THE TOTAL BORON IN MINERALS, ROCKS AND SOILS USING 1-1′ DIANTHRIMIDE

Determination of the total boron in minerals, rocks and soils is performed colorimetrically using 1-1′ dianthrimide, a reagent that features high sensitivity to boron and no need to separate the other elements in solution.

The test specimens are attacked by an alkaline fusion including anhydrous sodium carbonate. To decompose the alkaline crust and bring the boron to solution, either sulphuric or hydrochloric acid may be used. Next, filtration is proceeded with, insolubilization of the silica giving rise to boron losses. Yet, part-filtration is adequate.

The method is quick, accurate and reproducible.

ZUSAMMENFASSUNG

KOLORIMETRISCHE DOSIERUNG DES GESAMTEN BORES BEI DEN MINERALIEN, DEN GESTEINEN UND DEN BODEN VERMITTELS 1-1′ DIANTHRIMID

Die Bestimmung des gesamten Bores bei den Mineralien, den Gesteinen und den Böden wird kolorimetrisch durchgeführt vermittels 1-1′ Dianthrimid. Dieses bietet den Vorteil, dass es ein besonders borempfindliches Mittel ist und die Absonderung der anderen in Lösung befindlichen Elemente nicht erfordert.

Der Zerfall der Proben wird bewirkt durch alkalische Fusion unter Verwendung von anhydrischem kohlensaueren Natron. Zur Zersetzung der alkalischen Kruste und zur Auflösung des Bores ist es möglich, Schwefelsäure oder Salzsäure zu verwenden. Unmittelbar darauf folgt die Filtrierung, da die Unlöslichkeit der reinen Kieselerde Verlust von Bor nach sich zieht. Doch es genügt bereits eine teilweise Filtrierung.

Die Methode ist rasch, präzis und wiederholbar.

РЕЗЮМЕ

Колориметрическая дозировка одщего бора в минералах, породах и почвах, с помощью 1-1′ диантрамида.

Ж. МОРИС.

Колориметрическое определение валового бора минералов, порд и почв было проведено автором с помощью 1-1′ Диантрамида, представляющим большие преимущества, ибо благодаря его особенной чувствительности к бору, отпадает необходимость предварительного отделения этого элемента от остальных компонентов смеси.

Обработка проб производится при помощи щелочного растворения, с применением обезвоженного углекислого натрия. Чтобы разложить щелочную оболочку бора и привести его в растворенное состояние можно применить серную или соляную кислоту. Затем смесь необходимо профильтровать, так-как приведение кремния в нерастворимую форму вызывает потери бора. Достаточно только частичного фильтрования.

Методика эта отличается быстротой, точностью и легкой повторностью.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

CHARLOT G., 1966. *Les méthodes de la chimie analytique. Analyse quantitative minérale.* 1 vol. Masson et Cie Éditeurs, Paris.

DIBLE W. T., TRUOG E., BERGER K. C., 1954. Boron determination in soils and plants. *Anal. chem.*, **26**, 2, 418-421.

FLEET M. E., 1967. Spectrophotometric method for determining trace amounts of boron in rocks and minerals. *Anal. chem.*, **39**, 2, 253-255.

GRILLOT H., BÉGUINOT J., BOUCETTA M., ROUQUETTE C., SIMA A., 1964. Dosage du bore. *Mémoire du B. R. G. M.*, **30**.

GUPTA U. C., 1966. A modified procedure for the determination of total boron from soil fused with sodium carbonate. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **30**, 655-656.

KRAMER H., 1955. Determination of boron in silicates after ion exchange separation. *Anal. chem.*, **27**, 1, 144-145.

MAURICE J., TROCMÉ S., 1965. Observations sur le bore dans le sol et dans les plantes. I. Notes analytiques Dosage colorimétrique du bore total des végétaux et du bore soluble à l'eau des sols au moyen du 1-1′ dianthrimide. *Ann. agron.*, **16**, 3, 287-299.

TABLE DES MATIÈRES DE L'ANNÉE 1968

Bui Huu Tri. — Dynamique de la granulation du sol sous prairie 415

R. Chaminade. — Passage à l'état non échangeable des ions potassium et lithium. Étude du phénomène à l'aide des courbes de désorption par la chaleur de l'ion ammonium 631

J. Decau. — Les polysaccharides du sol : origine, évolution et rôle (*Revue bibliographique*) 65

J. Decau. — Contribution à l'étude de l'influence des conditions de milieu sur la répartition de l'azote dans le sol. I. — Principales formes d'azote obtenues par hydrolyse 653

J.-P. Deffontaines, R. Gras. — Les facteurs techniques de la production de la Pêche tardive en moyen Vivarais 5

J.-P. Deffontaines, F. de Montard. — Essai d'appréciation du danger d'érosion dans les vergers de fortes pentes en moyen Vivarais 349

J. Dejou, J. Guyot, J. Morizet. — Juxtaposition de sols noirs, très riches en matière organique et de sols bruns acides sur leucogranites dans la région d'Eymoutiers-Peyrat-le-Château (Haute-Vienne) 511

J. Dénarié. — Inoculation de légumineuses à Madagascar. Résultats expérimentaux 473

D. Kheyrabi, G. Monnier. — Étude expérimentale de l'influence de la composition granulométrique des terres sur leur stabilité structurale 129

J.-M. Lefebvre, Élisabeth Joliet. — Étude des variations de la composition protidique et glucidique des parties aériennes du Dactyle. Influence des fertilisations azotées. (Deuxième partie) 379

G. Lefèvre, G. Hiroux. — Données variétales sur l'évolution de la composition du Pois. (Première partie) 611

G. Lefort, M. Sebillotte. — Action du gel sur une culture de blé d'hiver en fonction du microrelief et de la fertilisation 685

A. Libois. — Dynamique de l'azote minéral en sol nu 103

C. Madelmont, Marie-Louise Daburon, Fanny Allin, Liliane Cappellini, Suzanne Bertrand. — Quelques observations sur les modalités de contamination par les retombées radioactives d'une parcelle de Luzerne en 1964 53

J. Mamy. — Recherches sur l'hydratation de la montmorillonite : propriétés diélectriques et structure du film d'eau. — Première et deuxième parties 175

— Troisième partie 251

Suzanne MÉRIAUX, A. LIBOIS, Ruth GROSMAN. — Nouvelles données sur la fertilisation potassique des plantes fourragères en sol granitique 459
H. METTAUER. — Contribution à la connaissance agro-pédologique des sols lourds de Lorraine 441
G. MONNIER, L. KONAN. — Influence des conditions de séchage des terres sur leur stabilité structurale 51
R. MOREL. — Évolution de l'azote et du carbone organiques du sol au cours d'une expérience de longue durée 153
H. MOULINIER, Rose MAZOYER. — Contribution à l'étude de l'action du chrome sur la croissance des végétaux 553
G. PÉDRO, J.-C. LUBIN. — Études sur l'évolution géochimique de gels aluminosiliciques et la formation des hydroxydes d'aluminium en conditions de libre drainage 293
J. PUECH, C. MAERTENS, S. FIORAMONTI, J.-R. MARTY, M. COURAU. — Comparaison des consommations d'eau et des productions de matière sèche de quelques cultures irriguées 365
W. ROUTCHENKO, E. LUBET. — Quelques précisions concernant les conditions d'emploi de l'urée dans certains sols du sud-ouest de la France.... 83
M. SEBILLOTTE. — Stabilité structurale et bilan hydrique du sol. Influence du climat et de la culture 403
Nicole SOUTY, R. GUENNELON. — Essai de dosage des éléments minéraux dans les végétaux. II. — Phosphore, chlore, potassium et calcium. Dosages chimiques et dosages par fluorescence X 569

Notes.

J. MAURICE. — Dosage colorimétrique du bore total des minéraux, des roches et des sols au moyen du 1-1' dianthrimide 699
J. QUÉMENER. — Exemples d'application de la méthode de STANFORD-DE MENT à des problèmes de fertilisation phosphatée 589
Chronique des livres 97, 497

CONTENTS

Bui Huu Tri. — Dynamics of soil granulation in grassland 415
R. Chaminade. — Alteration of potassium and lithium ions into non-exchangeable forms. Investigations of the process by means of the desorption curves of the ammonium ion obtained by heat 631
J. Decau. — Polysaccharides of the soil : origin, dynamics and role (*Review*). 65
J. Decau. — Contribution to the study on the effects of environmental conditions on the soil's nitrogen distribution. I. — Main forms of nitrogen derived through hydrolysis 653
J.-P. Deffontaines, R. Gras. — The technical factors governing the production of late variety of Peaches in middle Vivarais (France) 5
J.-P. Deffontaines, F. de Montard. — Tentative interpretation of the risk of erosion in steep orchards of the middle Vivarais (France) 349
J. Dejou, J. Guyot, J. Morizet. — Juxtaposition of black soils, very rich in organic matter and brown acid soils on leucogranites in the Eymoutiers-Peyrat-le-Château region (Haute-Vienne, France) 511
J. Dénarié. — Inoculation of legumes in Madagascar. Experimental results. 473
D. Kheyrabi, G. Monnier. — Experimental investigation on the part played by the granulometric composition of soils in their structure stability 129
J.-M. Lefebvre, Élisabeth Joliet. — Study of variations of the protein and glucide composition of the above-ground portion of *Dactylis* (Influence of nitrogen fertilizers) (Second part) 379
G. Lefèvre, G. Hiroux. — Varietal data on the development of the Pea's composition 611
G. Lefort, M. Sebillotte. — Action of frost on winter wheat as a function of microrelief and fertilization 685
A. Libois. — Dynamics of mineral nitrogen in bare soil 103
C. Madelmont, Marie-Louise Daburon, Fanny Allin, Liliane Cappellini, Suzanne Bertrand. — Observations on the contamination of a plot Lucerne (1964), brought about by radioactive fall-out 53
J. Mamy. — Research on the hydratation of montmorillonite : dielectric properties and structure of the water film. — First and second parts .. 175
— Third part 251
Suzanne Mériaux, A. Libois, Ruth Grosman. — Fresh data on potassic fertilizing of forage plants in granitic soils 459
H. Mettauer. — Contribution to the agro-pedological knowledge about the heavy soils of Lorraine (France) 441
G. Monnier, L. Konan. — Effects of the drying conditions of soils on their structural stability 541
R. Morel. — Evolution of the nitrogen and organic carbon in the soil over a long-term experiment 153
H. Moulinier, Rose Mazoyer. — Contribution to the study on the action of chromium on the growth of plants 553

G. Pedro, J.-C. Lubin. — Geochemical studies of the evolution of alumino-silicic gels and genesis of aluminium hydroxides under drainage conditions 293

J. Puech, C. Maertens, S. Fioramonti, J.-R. Marty, M. Courau. — Comparison between the water uptake and the dry matter production of some irrigated crops 365

W. Routchenko, E. Lubet. — Various particulars on the incorporation of urea into certain soils of South-western of France 83

M. Sebillotte. — The structure stability and water balance of soils. Influence of the climate and of the crop 403

Nicole Souty, R. Guennelon. — Experimental determination of mineral elements in plants. II. — Phosphorus, chlorine, potassium and calcium chemical and X-fluorescence determinations 569

Notes.

J. Maurice. — Colorimetric analysis of the total boron in minerals, rocks and soils using 1-1' dianthrimide 699

J. Quémener. — Examples of applying the Stanford-de Ments's method to problems of phosphatic fertilization 589

Book rewiew 97, 497

RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 27, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles séparées seront utilisées pour les références bibliographiques, les tableaux, les légendes des figures et graphiques. etc.

Au début de chaque mémoire, on indiquera : — *le titre du mémoire* : il ne devra pas comporter d'abréviation ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs*, précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de... ; — *le nom de l'établissement*, dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

Les mémoires seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :

a) *sommaire* : résumé suffisament précis pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction* dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé*, en donnant sous une forme concise, tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats* à présenter de la manière la plus brève possible ; e) *discussion et conclusion* f) *résumé* destiné à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour les collaborations, les fonds, les dons... ; h) *Références bibliographiques*.

Les travaux originaux en anglais doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français très *complet* placé en tête de l'article. Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

Pour les autres documents (notes, mises au point, revues, rapports, etc.) l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

Les références bibliographiques doivent être citées dans le texte de la manière suivante : (DUPONT et DUVAL, 1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de *et al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

Pour les articles : le (s) nom (s) de (s) auteur (s) suivi (s) des initiales du (des) prénom (s) ; la date de parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatre langues mentionnée) : le titre du périodique en abrégé, selon *World List of Scientific Periodicals* ou le *Bulletin Signalétique du C. N. R. S.* : le volume : la première et la dernière page de l'article.

Pour les ouvrages: le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés, et, si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera en plus le nom de l'auteur du chapitre cité, le nom des rédacteurs principaux, précédé de la mention « in », le titre de l'ouvrage.

La mention de « communication personnelle » ou « données non publiées » etc., doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d' « Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies, doivent être fournis à part. Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérotations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponibles est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit.

Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur feuille séparée, et porter les numéros des figures.

Les graphiques, schémas, cartes, dessins d'appareils seront envoyés *à l'état de projets*, leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5, *soit* × 0,25.

Il est rappelé que le format utile des Annales est : 16 × 24 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

Photographies : Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos 9 × 12, 4 photos 9 × 5,5, 6 photos 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible après clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur feuilles séparées et porter les numéros des figures.

Correction des épreuves : les auteurs recevront deux épreuves à corriger.

Envoi du manuscrit : M. HENIN. Centre national de Recherches agronomiques, 78 - Versailles (France). On demande deux exemplaires.

Le Directeur de la publication : M. L. CAGNAC

Imprimerie Bussière à Saint-Amand (Cher), France. — 1-1969.

Dépôt légal : 1er trimestre 1969. N° d'impression : 2987.